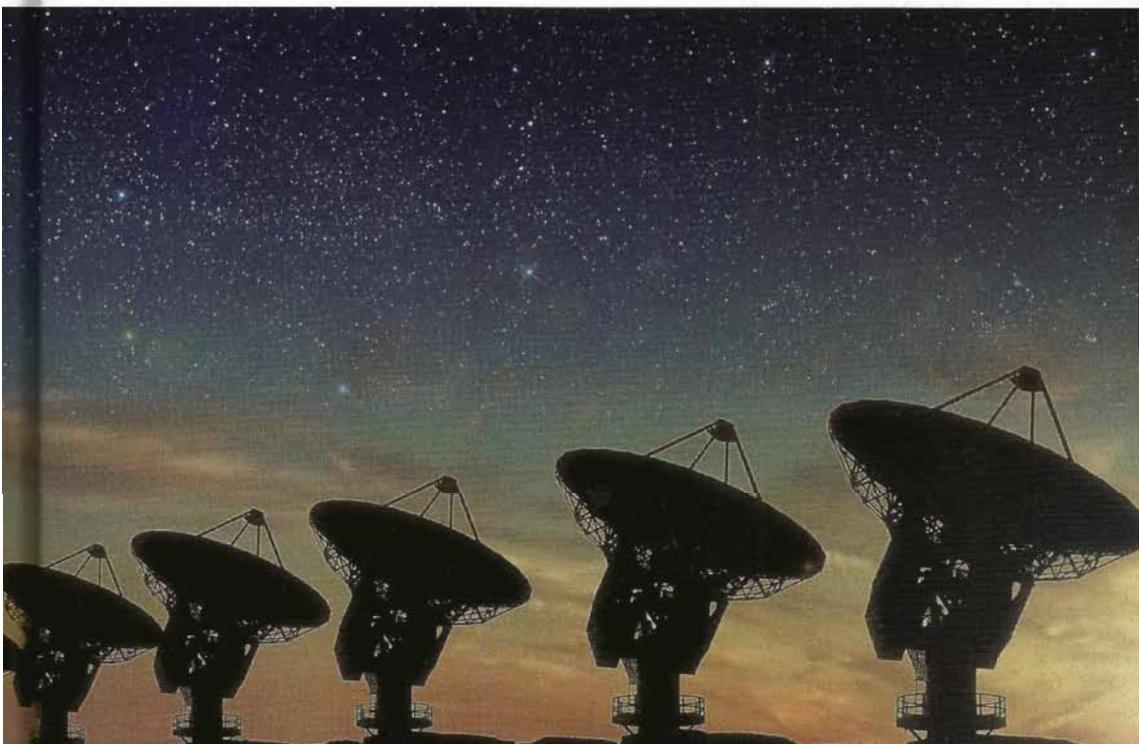


La vida no terrestre

¿Estamos solos en el universo?



Un paseo por el
COSMOS



The Doctor y La Comunidad

Redigirización: The Doctor

<http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/>

<http://el1900.blogspot.com.ar/>

<http://librosrevistasinteresesanexo.blogspot.com.ar/>

<https://labibliotecadeldrmoreau.blogspot.com/>

La vida no terrestre

¿Estamos solos en el universo?

Imagen de cubierta: La búsqueda de vida fuera de la Tierra cada día cuenta con más y mejores herramientas. Diversas misiones avanzan en la exploración del sistema solar, mientras que telescopios cada vez más potentes se disponen a rastrear indicios de actividad biológica en exoplanetas lejanos. E incluso puede que detecten señales inteligentes procedentes de otras civilizaciones.

*A Marisa
A mi hermano Pepe*

Dirección científica de la colección: Manuel Lozano Leyva

© Juan Antonio Aguilera Mochón por el texto
© RBA Contenidos Editoriales y Audiovisuales, S.A.U.
© 2016, RBA Coleccionables, S.A.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: tactilestudio

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: Archivo RBA: 56a; Sébastien Decoret /123RF: portada; ESA: 111, 149; ESO/R. West: 148; NASA: 123b, 157, 167; NASA/Adler/Universidad de Chicago/Wesleyan/JPL-Caltech: 73, 79; NASA/JPL-Caltech: 84, 117; NASA/JPL-Caltech/ASI/Cornell: 123a; REUTERS/Cordon Press: 151a, 151b; Science Photo Library/Age Fotostock: 56b, 164.

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

ISBN: 978-84-473-8665-9

Depósito legal: B-13300-2016

Impreso y encuadrado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - *Printed in Spain*

INTRODUCCIÓN 7

CAPÍTULO 1 La vida: origen y definición 13

CAPÍTULO 2 ¿Qué tipo de vida? 39

CAPÍTULO 3 El universo como escenario biológico 67

CAPÍTULO 4 Búsqueda y expansión de la vida en el sistema solar . . 97

CAPÍTULO 5 Búsqueda de vida más allá del sistema solar 129

CAPÍTULO 6 El contacto con inteligencias lejanas 153

LECTURAS RECOMENDADAS 171

ÍNDICE 173

Pocas cuestiones nos conmueven tanto como la de si estamos solos en el universo, o si, por el contrario, hay más vida «ahí fuera». Y, por primera vez en la historia de la humanidad, estamos en disposición de alcanzar respuestas científicas. Si, de algún modo, averiguáramos que no la hay, el sentimiento colectivo de soledad sería hondísimo, a la vez que, al vernos con un estatus único, nos sobrecogería la responsabilidad por mantener la llama de la vida y la inteligencia cósmicas. Si resulta, en cambio, que sí existe, la excitación sería descomunal, cambiaría nuestra perspectiva de cómo encajamos en el universo. ¿Se parece a nosotros?, ¿es inteligente?, ¿podemos comunicarnos?, ¿nos beneficiará, o perjudicará? El físico y escritor británico Arthur C. Clarke (1917-2008) resumió el alcance del dilema en una célebre frase: «Existen dos posibilidades: que estemos solos en el universo o que no lo estemos. Ambas son igualmente estremecedoras».

Desde que se ha reflexionado sobre el asunto, en general ha prevalecido la «opinión» de que no estamos solos. Muchas culturas antiguas contaban historias sobre seres que viven entre las estrellas. En los siglos IV y III a.C., Aristarco de Samos y Epicuro ya pensaban que el universo está poblado de otros mundos

en los que puede haber vida. Desde entonces, muchas personas han defendido lo mismo. En 1584, el napolitano Giordano Bruno (1548-1600) publicó *Del universo infinito y los mundos*, en el que escribió sobre estrellas como nuestro Sol, planetas que las orbitaban y seres sintientes habitando en estos planetas: «Hay innumerables soles y un número infinito de planetas que giran alrededor de sus soles, como nuestros siete planetas circulan alrededor de nuestro Sol». Sin embargo, sigue Bruno, no somos capaces de ver estos planetas y soles «debido a su gran distancia o pequeña masa». Bruno pagó cara su osadía intelectual. La Inquisición ordenó su muerte y fue quemado en la hoguera el 17 de febrero de 1600 en Roma.

No solo han cavilado sobre ello filósofos, literatos y científicos —como es de suponer, con muy diverso rigor—. En el pensamiento popular, la idea de la vida extraterrestre no ha sido rara, más bien una «creencia» a menudo secundaria a la de la existencia de seres, más que celestes, celestiales, como ángeles y demás entes ultramundanos del ámbito religioso. Y en las últimas décadas, la literatura y sobre todo el cine han alimentado esperanzas o temores sobre seres alienígenas bondadosos o temibles, pero en general mucho más avanzados tecnológicamente que nosotros.

El problema siempre ha sido confundir la fantasía y la ficción con la realidad, dando lugar a una nefasta credulidad que alimenta la superstición. La ciencia moderna por fin empezó a aportar datos objetivos de cierta relevancia para la cuestión de la vida extraterrestre, y los diversos hallazgos unas veces alimentaron las expectativas y otras las frenaron. Así, con el descubrimiento del telescopio en el siglo xvi, cualquier formación en la Luna, o sobre todo en Marte, tendía a interpretarse como fruto del trabajo de una civilización avanzada.

La creencia en la vida extraterrestre parecía la continuación natural de la asunción de que la vida se forma con suma facilidad. Recordemos la confianza en la supuestamente cotidiana *generación espontánea* de la vida; para que surgieran ratones no había más que tener unos trapos sucios, o carne podrida para los gusanos. En el campo científico, el error empezó a refutarse

en el siglo xvi, pero fue el químico francés Louis Pasteur (1822-1895) quien en 1862 acabó definitivamente con él a través de una serie de célebres experimentos, en los que mostró cómo una disolución adecuadamente esterilizada y protegida del contacto con microbios permanecía indefinidamente estéril.

Este golpe al optimismo sobre la formación de la vida no pareció afectar de inmediato a la fe de muchos en los extraterrestres. Recordemos en este sentido la popularidad, a finales del siglo xix y principios del xx, de los llamados «canales de Schiaparelli» en Marte, defendidos por el astrónomo estadounidense Percival Lowell (1855-1916) como estructuras creadas por una civilización marciana. Aunque cada vez más científicos mostraron su escepticismo o abierto rechazo ante esas pretensiones, hubo que esperar a las imágenes de Marte tomadas por la sonda espacial Mariner 4 (1965) y a los mapas realizados con la Mariner 9 (1971) para desinflar las expectativas sobre los marcianos y los «alienígenas» en general.

Por otro lado, y de manera inevitable, se fue abordando el problema que trajo consigo el fin de la creencia en la generación espontánea. Si toda vida procede de otra, ¿cómo apareció la primera? Era necesaria una generación «primordial», la formación ancestral de vida a partir de no-vida.

En 1953, el exitoso experimento de Stanley Miller en el que consiguió formar aminoácidos y otros compuestos de interés *probótico* (para la formación de vida) en una sencilla simulación de las condiciones de la Tierra primitiva, alentó sobremanera las ilusiones de una relativamente fácil formación prístina de la vida. Pero las décadas posteriores nos hicieron muy conscientes de la enorme dificultad de formar seres vivos a partir de materia inorgánica. Desde entonces, en general, el optimismo desaforado ha ido parejo al desconocimiento de estas dificultades, así como el pesimismo extremo ha venido de la ignorancia de los prometedores avances producidos.

Un dato a favor de la ubicuidad de la vida en el universo es su ubicuidad en la Tierra. Encontramos seres vivos en nuestro planeta en condiciones consideradas muy extremas (de temperatura, presión, pH, salinidad...), aparentemente muy hostiles,

por lo que cabe esperar que al menos se halle en algunos ambientes similares fuera de nuestro planeta. Sin embargo, una cosa es la expansión de la vida y otra su génesis. Una vez que existe la vida, muestra una gran tendencia a la conquista de nuevos ambientes, pero estos no tienen por qué ser idóneos para su aparición. Las condiciones para el origen podrían ser mucho más estrictas.

El último dato que alienta el optimismo respecto a la vida por todo el universo está siendo la constatación de algo que ya presuponían desde el filósofo griego Anaxágoras (500-428 a.C.) hasta Bruno. Desde mediados de la década de 1990, no ha dejado de crecer el descubrimiento de planetas extrasolares, o exoplanetas, cada vez más de tipo terrestre, y posibles localizaciones de una vida semejante a la que conocemos.

El desarrollo científico de la sociedad debería suponer un incremento del pensamiento crítico de los ciudadanos, pero por desgracia en muchos casos dista de ser así. Por ello, en paralelo al avance científico en nuestros conocimientos sobre el universo y la vida, desde los años 1950 se ha extendido con demasiado éxito toda una pseudociencia, la llamada ufología. Sus «creyentes» están convencidos de que los extraterrestres nos visitan en platillos volantes, de que han tenido intervenciones en la historia de la humanidad, etc. La popularidad de los «ovnis» tiene un aspecto positivo: la extendida fascinación por la vida en el universo. Lo lamentable es que el enfoque pseudocientífico promueve la irracionalidad y el fraude. Nada mejor para evitarlos que el rigor de la aproximación científica, especialmente enriquecedora al ser multidisciplinar (entran en juego sobre todo la física, la química, la geología, la astronomía y la biología). Es una oportunidad excelente para mejorar la educación científica general y clarificar la distinción entre ciencia y pseudociencia. Y para mostrar que la realidad y la aventura de la indagación científica sobre ella son infinitamente más apasionantes y enriquecedoras que la palabrería trampa.

Cuando nos preguntamos por «otra vida» en el universo nos interesa desde la más simple a la más compleja e inteligente, parecida o no a la nuestra. En cualquier caso, el hallazgo sería

trascendente, pero ¿cómo concretar la pregunta y la eventual búsqueda? El abordaje científico de la vida fuera de la Tierra ha acabado generando toda una disciplina científica. Se trata de la *exobiología*, propuesta por el microbiólogo estadounidense Joshua Lederberg (1925-2008) en 1960 y del gusto de la Agencia Espacial Europea, ESA, o *astrobiología*, denominada así por el astrónomo ruso-estadounidense Otto Struve (1897-1963) en 1955 y preferida en Estados Unidos, en particular por su agencia espacial, la NASA. Pero hay una diferencia sustancial entre ambas: la exobiología no incluye la vida terrestre, y la astrobiología, sí. Para este segundo enfoque también tenemos la *cosmobiología*, que propuso el Nobel de Química irlandés John D. Bernal (1901-1971) en 1952.

Con el nombre que se quiera, la ciencia que se ocupa de la vida en el universo está cada vez más establecida, y cuenta con investigadores y centros de primer orden, como los asociados a la NASA (entre los que destaca el Centro de Astrobiología del CSIC-INTA en Madrid), la ESA, el italiano Istituto Nazionale di Astrofísica, el Instituto de Astrofísica de Andalucía (CSIC) y otras muchas universidades e instituciones. Todos ellos se plantean preguntas esenciales sobre nosotros y lo que nos rodea: ¿qué es la vida?, ¿cómo comenzó en la Tierra?, ¿hay vida, e incluso inteligencia, fuera de la Tierra?, ¿podríamos extender la vida a otros lugares?, ¿podríamos comunicarnos con otros seres inteligentes?

Las respuestas a las preguntas, e incluso su mero planteamiento, pueden afectar profundamente a la manera en que nos vemos a nosotros mismos. ¿Somos fruto del azar?, ¿somos muy especiales, o algo común? En el estudio, la búsqueda y la reflexión, encontraremos con frecuencia una tensión entre el pensamiento antropocéntrico, con su idea de que somos únicos, especiales y el centro del universo, y la contraria, según la cual somos una mota de polvo no muy diferente de incontables motas similares. Esta última se corresponde con el *principio copernicano*, con el que ya hemos aprendido que la Tierra no es el centro del sistema solar, que este no es el centro de nuestra galaxia (la Vía Láctea) y que esta no es el centro del universo.

Sin embargo, los flascos históricos de la visión antropocéntrica no nos deben llevar a prejuzgar un problema nuevo sin analizar datos y argumentos. Tenemos la gran dificultad de que conocemos solo un tipo de vida, y hemos de ser cuidadosos para no caer en extrapolaciones apresuradas e injustificadas. Merece la pena el esfuerzo, porque estamos ante uno de los retos más inquietantes y fascinantes a los que se enfrenta el conocimiento humano.

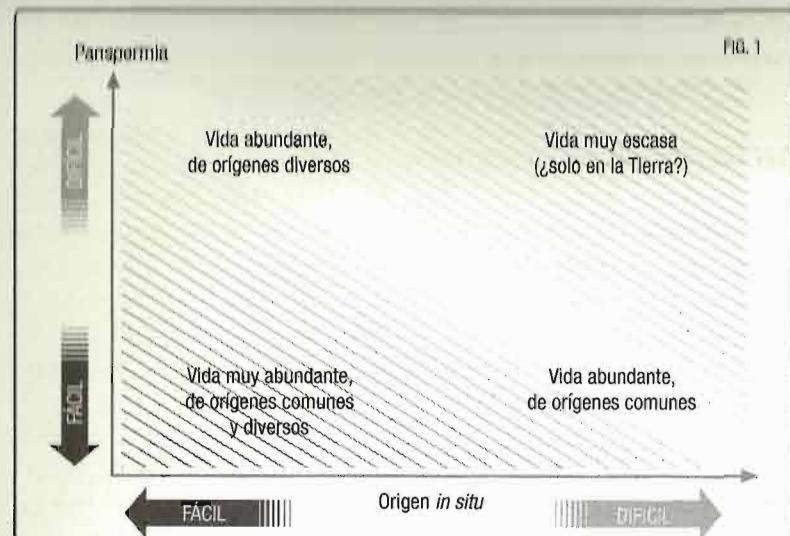
CAPÍTULO 1

La vida: origen y definición

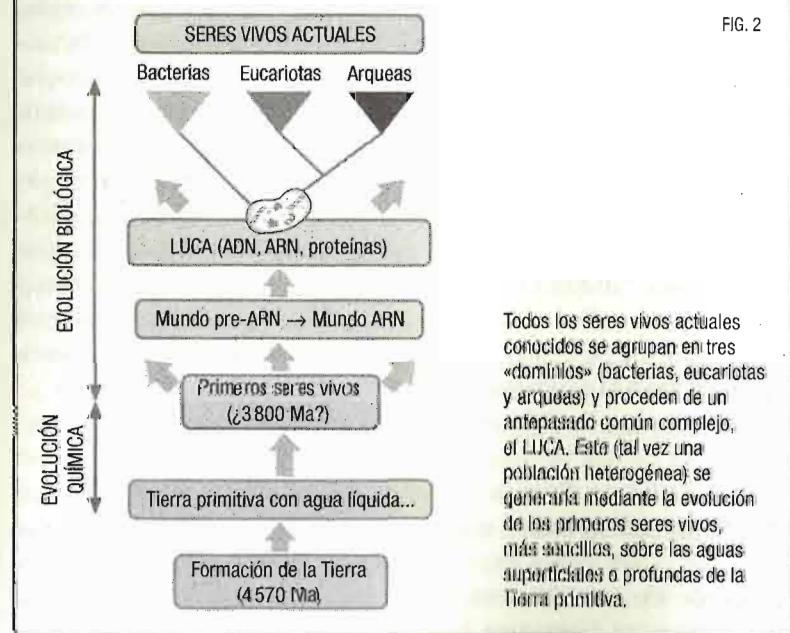
No debemos afrontar la cuestión de la vida fuera de la Tierra sin conocer todo lo posible sobre su origen en el único sitio donde nos consta que existe, nuestro planeta. Eso nos ayudará a plantearnos qué es lo que buscamos, es decir, qué es la vida. Tanto la conocida como la posible.

¿Cómo comenzó la vida que hoy puebla la Tierra? Desde la ciencia excluimos el origen divino y la existencia eterna de la vida, de modo que nos quedan dos posibilidades serias. Según la primera, la vida llegó a la Tierra desde fuera. Es lo que se conoce como *panspermia* (del griego *pan*, «todo», y *sperma*, «semilla»), que han defendido científicos de la talla del químico sueco Svante Arrhenius (1859-1927), el astrónomo británico Fred Hoyle (1915-2001) y el físico y biólogo británico Francis Crick (1916-2004). Puede tratarse de una panspermia «accidental» o, por el contrario, «intencionada» (que, como veremos, empezamos a poder desarrollar nosotros mismos). Es posible que, a nivel cósmico, la panspermia de un tipo u otro contribuya de manera significativa a la abundancia de vida (figura 1).

Sin embargo, la hipótesis que se considera mucho más probable es la de que la vida se generó en la propia Tierra. A pesar de la apabullante diversidad que podemos observar en los seres vivos, bajo ella subyace una unidad bioquímica extraordinaria que tiene como única explicación verosímil que todos descendamos de un ancestro común, al que se denomina *LUCA* (por *Last Universal Common Ancestor*, «último antepasado común



La probabilidad de panspermia y del origen *in situ* de la vida repercutiría sobre la abundancia de esta en el universo.



universal». En torno a él podemos resumir la historia de la vida en nuestro planeta según vemos en la figura 2.

RECONSTRUYENDO LA HISTORIA DE LA VIDA

Esta reconstrucción funciona bastante bien entre el presente y el LUCA, y se concreta en un buen «árbol universal de la vida», aunque queden incertidumbres. Lo más enigmático es el periodo que va desde la Tierra primigenia sin vida hasta el LUCA. En medio de ese camino estarían los primeros seres vivos, que lo precedieron, pues el LUCA debió tener antepasados más remotos, más primitivos en varios sentidos. Estos pudieron dar lugar, además de al LUCA, a líneas descendientes extinguidas (flechas laterales en la figura). La historia de la vida no se entiende sin un sinnúmero de extinciones y líneas fracasadas.

Para llevar a cabo la reconstrucción desde la Tierra primitiva, necesitamos saber cuándo apareció la vida, de lo que nos informan los fósiles más antiguos conocidos. Los que menos dudas ofrecen los encontró el paleontólogo británico Martin Brasier (1947-2014) en el oeste de Australia, y tienen unos 3400 millones de años (Ma) de antigüedad. Hay unos indicios químicos de vida de unos 3800 Ma en Groenlandia, pero no se excluye que sean debidos a causas *abióticas*, es decir, no producidas por seres vivos. La mayoría de los autores aceptan que probablemente la Tierra albergaba seres vivos hace 3500-3800 Ma, pero no se puede descartar que la vida apareciera antes y no dejara rastros. Tal vez pudo haber agua líquida desde hace unos 4400 Ma, es decir, unos 200 Ma después de la formación del planeta, pero si apareció la vida entonces, pudo quedar aniquilada por un gran bombardeo meteorítico que finalizó hace unos 3900 Ma.

¿Todo empezó en una... sopa?

El propio Charles Darwin, muy consciente del problema de la aparición de los primeros seres vivos, sugirió, en su correspon-

dencia, un escenario: una «charca cálida». Pero hubo que esperar a la década de 1920 para que el bioquímico ruso Aleksandr I. Oparin (1894-1980) y el genetista británico John B.S. Haldane (1892-1964) propusieran hipótesis científicas sobre el origen de la vida. Los dos postularon que en la Tierra primitiva se produciría una «evolución química», de modo que, a partir de materiales inorgánicos sencillos, se generaría una «sopa orgánica» cada vez más compleja, generadora de los ladrillos de construcción de los primeros seres vivos.

En el año 1952, un joven doctorando de la Universidad de Chicago, Stanley Miller (1930-2007), diseñó, junto con su director de tesis, Harold Urey (1893-1981, premio Nobel de Química en 1934 por el descubrimiento del deuterio), un aparato en el que se simulaba el ciclo del agua entre los océanos y la atmósfera de aquella Tierra primitiva. Esta carecería de oxígeno, y tendría en cambio hidrógeno, metano y amoniaco, además del vapor del agua. Sometieron la «atmósfera» a descargas eléctricas («rayos») de 60 000 voltios, y a los pocos días aparecieron en el agua diversos compuestos orgánicos, entre ellos algunos de los aminoácidos constituyentes de las proteínas. El experimento de Miller-Urey reforzó la hipótesis de la sopa y supuso el inicio de la *química prebiótica*.

Cianuro, formol y la síntesis de un LUCA muy complejo

Se sucedieron miles de experimentos de simulación de las condiciones reinantes en la Tierra primitiva, en los que se emplearon las fuentes de energía que más abundarían en ella: radiaciones solares, descargas eléctricas, calor y radiactividad. Y se fueron probando distintos escenarios, casi siempre atmosférico-acuáticos. En aquellos escenarios con atmósferas ricas en CO₂, más plausibles en la Tierra joven que la atmósfera «de Miller», el rendimiento de las reacciones decae mucho, pero se supone que la entrada de materia orgánica procedente del espacio, ya fuera «a bordo» de meteoritos o de cometas, lo pudo compensar.

De esa multitud de experimentos puede extraerse una gran conclusión: el ácido cianhídrico (HCN) y el formaldehído (HCOH, formol cuando se disuelve en agua) son intermediarios esenciales en muchas de esas síntesis, aunque hoy los veamos como un terrible veneno y un conservante de cadáveres, respectivamente. El agua también es esencial, por supuesto, con sus convenientes propiedades como disolvente polar, entre otras. También la ausencia de oxígeno (O₂) fue crucial; debido a su poder oxidante, en los experimentos reduce casi a cero el rendimiento de compuestos prebióticos de interés.

Sin embargo, incluso en el caso de que hubiera abundancia de todos los componentes básicos de los seres vivos, todavía quedaría un difícil camino por delante hasta formar los primeros organismos, y más aún hasta el LUCA. A pesar de su sobrecedora diversidad, todos los organismos que pueblan la Tierra tienen unos notables «denominadores comunes» esenciales que cabe esperar que estuvieran ya presentes en aquel LUCA. La vida se sustenta en el trabajo de las enzimas, las proteínas que catalizan (aceleran) la compleja red de reacciones bioquímicas que constituye el llamado *metabolismo*. Las proteínas se sintetizan a partir de 20 aminoácidos que, como monómeros, se unen entre sí formando polímeros, es decir largas cadenas, en un orden determinado por las secuencias de *nucleótidos* (moléculas que contienen las *bases* adenina, timina, guanina o citosina) de los ADN (ácidos desoxirribonucleicos) que las codifican, conformando los genes.

Para el funcionamiento del organismo ancestral serían pues fundamentales las enzimas, que se sintetizan gracias a la información contenida en el ADN, que antes debe transcribir tal información en otros ácidos nucleicos, los ARN (ácidos ribonucleicos). Pero para que el ADN se duplique y exprese su información también hacen falta las enzimas. Es el problema del huevo y la gallina aplicado al origen de toda la vida (y no debemos olvidar la necesidad de membranas que sustenten la celularidad). Parece que hizo falta que se formara todo a la vez, lo que de entrada se antoja enormemente improbable. Ahí estábamos, en un callejón sin salida, cuando llegó un descubrimiento inesperado.

El mundo del ARN

Los bioquímicos Thomas R. Cech (n. 1947), en 1982, y Sidney Altman (n. 1939), en 1983, mostraron que algunos ARN tienen capacidades catalíticas. En otras palabras, que pueden funcionar como enzimas, algo que parecía exclusivo de las proteínas. Los ARN enzimáticos se denominan *ribozimas*. Por su descubrimiento, Cech y Altman recibieron el premio Nobel de Química en 1989.

Con las ribozimas, ya no hacía falta suponer que surgieron a la vez las proteínas y los ADN que las codifican. Pudo haber lo que se llamó un *mundo del ARN*, en el que los ARN eran capaces de casi todo lo importante: portar la información genética (como ocurre en tantos virus) y catalizar las reacciones (bio)químicas.

Sin embargo, y aunque recientemente ha habido importantes avances, simulando condiciones prebióticas no hemos conseguido formar ARN de manera creíble. Por eso se piensa que es probable que lo precediera un tipo de polímero con capacidades similares que sí se pudiera formar bien en la Tierra primitiva. Se están estudiando algunos candidatos, que se llaman de forma genérica pre-ARN.

En la hipótesis del mundo del ARN, inicialmente se prescindía de las membranas, pero es poco verosímil que los ARN se encuentren en disolución libre sin mayor protección, pues tienden a romperse en contacto con el agua (*hidrolizarse*). Cada vez se está viendo más claro que lo más probable es que las membranas envolvieran a los ARN desde el principio, formando precélulas. Todo ello en estos escenarios ligados a aguas superficiales, pero no existe un acuerdo generalizado de que ese fuera el mejor ambiente para la aparición de la vida.

¿Un mundo del hierro-azufre sobre los fondos marinos?

En 1988, el químico alemán Günter Wächtershäuser (n. 1938) sorprendió con una explicación detallada de cómo la vida pudo comenzar en los fondos oceánicos, en las cercanías de las fuentes termales submarinas conocidas como «fumarolas negras».

En estas se han encontrado ecosistemas riquísimos, con organismos como grandes gusanos y crustáceos (además de bacterias y arqueas), que dependen del flujo de materiales y calor procedentes del interior de la Tierra. Para el geoquímico escocés Michael Russell y otros, el ambiente submarino más interesante lo conforman, en cambio, unas chimeneas hidrotermales mucho más «alcalinas» y menos calientes que las «negras», rodeadas de un entorno ácido. En unas y otras desempeñarían papeles fundamentales el azufre y el hierro.

Hoy hay una encendida controversia entre estos dos posibles ambientes primigenios: las aguas someras (con una vida ligada a la luz solar y otras fuentes de energía «superficiales») y las profundas (con vida dependiente de reacciones en gradientes termoquímicos). Mientras que no obtengamos nuevos datos experimentales que nos permitan decantarnos por una de esas alternativas, lo prudente, de cara a considerar las posibilidades de vida fuera de la Tierra, es considerar que ambas son factibles. Tampoco conviene descartar definitivamente otras propuestas menos elaboradas y defendidas, como la que sugiere un inicio de la vida ligado a la química de los aerosoles: las gotitas formadas en la atmósfera gracias al viento, las olas, etc., pudieron favorecer reacciones de interés.

El universo no solo es más extraño de lo que suponemos, sino más extraño de lo que podemos suponer.

JOHN B.S. HALDANE

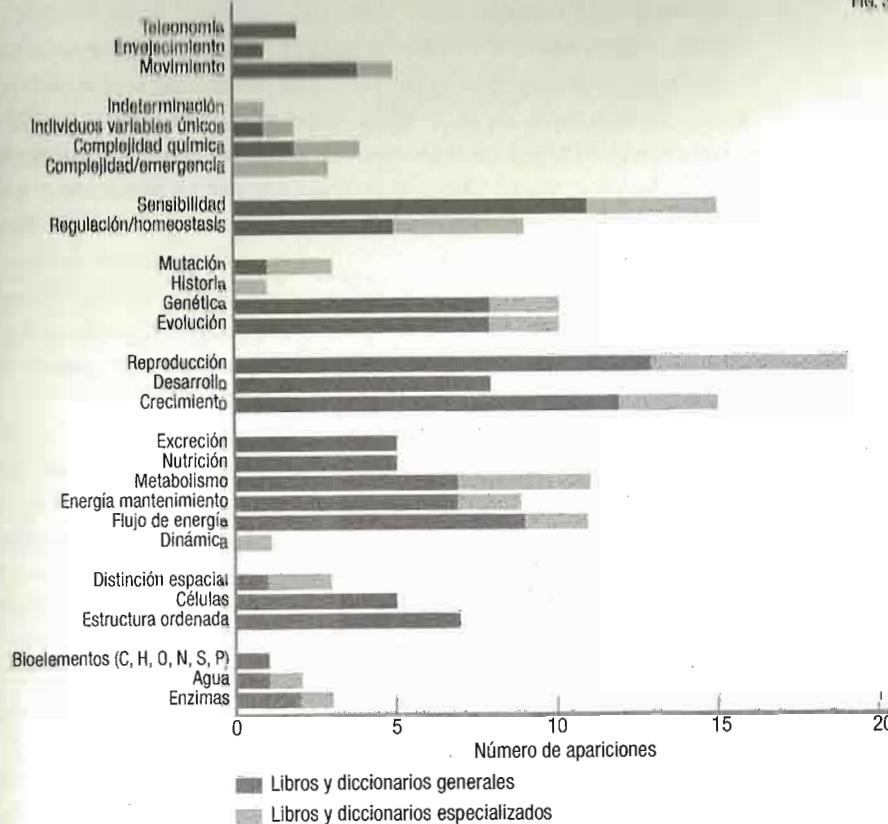
El calendario de la vida en la Tierra

En números redondos, tras la formación de la Tierra hace unos 4600 Ma, la vida pudo tardar en aparecer unos 800 Ma, pero hubo que esperar unos 2500 Ma para que surgieran las células eucariotas, provistas de núcleo y características de la vida más visible y compleja. Entonces ya había un 1% de O₂ en la atmósfera, y siguió aumentando hasta el 21% actual gracias a la fotosíntesis. Los organismos pluricelulares se demoraron unos 3100 Ma, los vertebrados unos 4200 Ma, y la línea humana poco menos de los 4600 Ma.

Estamos hablando del origen de la vida, pero ¿a qué nos referimos cuando decimos «vida»? Ante tal pregunta, solemos identificarnos con lo que dijo el juez estadounidense Potter Stewart en 1964 sobre la pornografía: «No sé definirla, pero la reconozco cuando la veo». Es decir, confiamos en nuestra intuición y sentido común para reconocer la vida. Sin embargo, los científicos han desarrollado un justificado escepticismo frente a la intuición y al sentido común, pues ni son tan comunes, ni, aún menos, garantía de certeza. Esto es especialmente cierto cuando nos enfrentamos a una posible vida extraterrestre, puesto que no es algo precisamente común para nuestra experiencia.

Algunos autores dicen que hoy es imposible definir o caracterizar inequívocamente la vida, pero no debemos dejar que esas objeciones nos paralicen. Recordemos que, de hecho, ya podemos caracterizar la vida terrestre infinitamente mejor que antes del desarrollo de la biología moderna. Para el objeto de este libro, nos interesa saber si es factible el «reconocimiento» incuestionable de la vida, o de los seres vivos. Y para responder, debemos distinguir dos casos. El primero es precisamente el de «la vida tal como la conocemos». El segundo, «cualquier» vida posible.

La vida tal como la conocemos corresponde a la que todos creemos ser capaces de identificar. Según la visión popular, pre-científica, e incluso de diccionarios y libros de texto (figura 3), esta vida se caracteriza mediante un listado de propiedades o características necesarias que en conjunto se consideran suficientes: reproducción, metabolismo, morfología, etc. Esa identificación puede resultar poco satisfactoria e imprecisa, pero si se atiende a los avances en biología sí se consigue: hoy sabemos que todos los organismos conocidos sobre la Tierra tienen unas características comunes muy claras, así que no hay más que especificarlas. Todos son de naturaleza celular y funcionan a base de la información genética contenida en los ácidos nucleicos (ADN y ARN), y de las proteínas que estos codifican, muchas de las cuales catalizan un metabolismo con rasgos semejantes



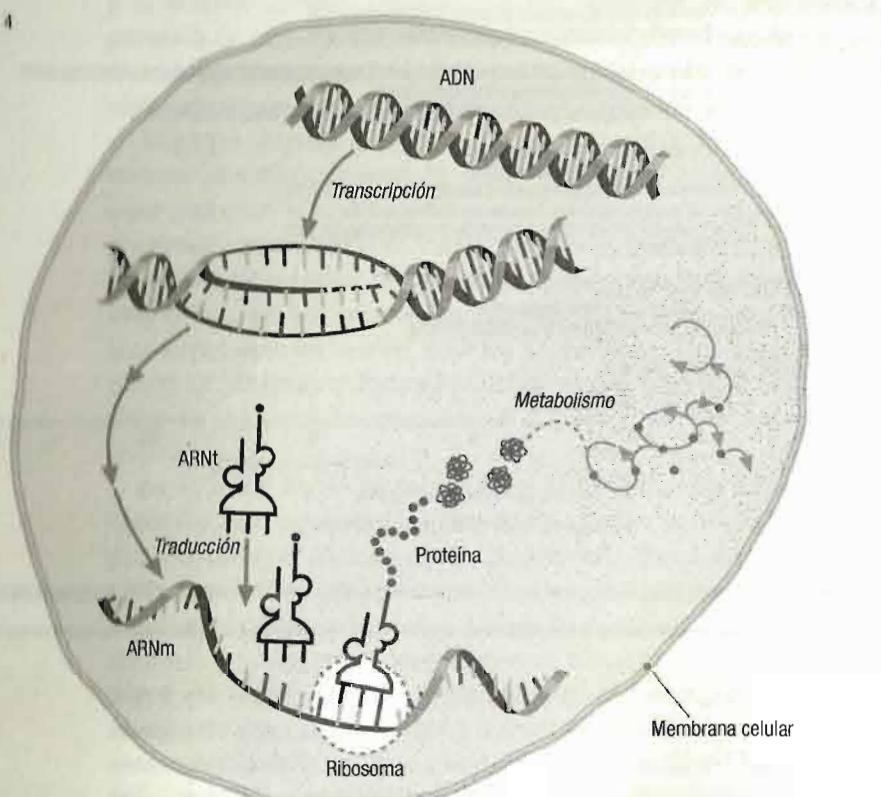
Características de «la vida» o «los seres vivos», según distintos libros y diccionarios generales o especializados.

(figura 4). Los procesos por los que el ADN se «replica», y por los que su información (la secuencia de nucleótidos) se «transcribe» a ARN, y la de este se «traduce» en los ribosomas a proteínas según dicta el «código genético», son esencialmente los mismos en todos los organismos. No encontramos ninguna de esas estructuras y procesos en el mundo natural no vivo, por lo que cualquiera de ellos serviría para reconocer este tipo de vida, aquí y en otros mundos. Además, podemos apelar a la evolución

darwiniana como causa fundamental de su diversificación a partir de un origen común.

Pero si pensamos no solo en la vida que hoy vemos, nos enfrentamos, para empezar, con el caso de la vida tal como «era», y de su origen a partir de la no-vida. El problema es que este origen debió de ser un proceso continuo y no es fácil poner un límite no arbitrario. Aun en este caso, no hay nada grave en juego, se puede considerar un asunto meramente académico. La gran dificultad

FIG. 4



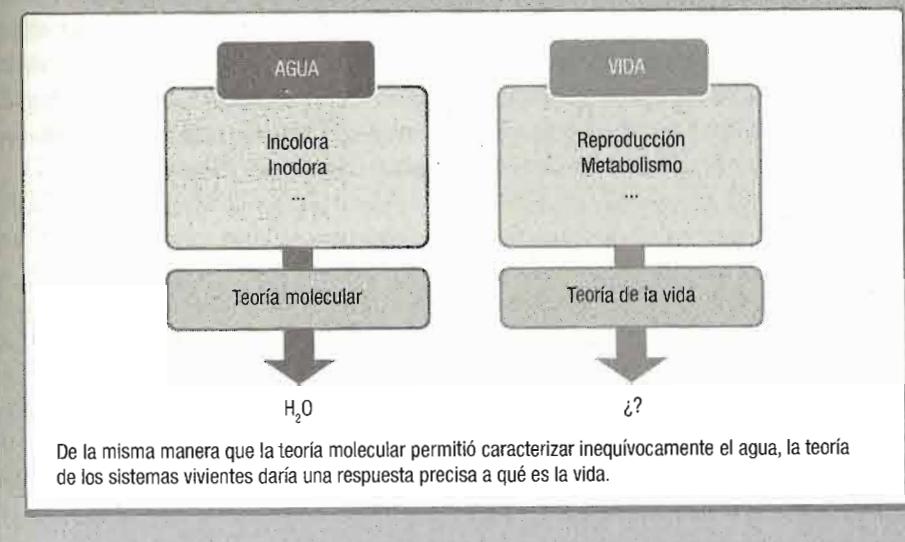
La unidad bioquímico-celular de la vida presenta tres características: una base genética, un metabolismo y una celularidad o compartimentación.

¿DEFINICIÓN O TEORÍA DE LA VIDA?

No hay ninguna definición de «vida», o de «ser vivo», aceptada por todos, ni siquiera por la gran mayoría. Algunos autores argumentan que conociendo un solo ejemplo de vida es imposible. Para el astrobiólogo Christopher Chyba y la filósofa Carol Cleland, ambos estadounidenses, el problema reside en que la idea de que la vida se puede definir está mal enfocada. Tenemos muchas dificultades para definir términos como «agua», «calor» o «pájaro», porque designan categorías que están delimitadas por la naturaleza, no por los intereses y preocupaciones humanos. Concluyen que una respuesta satisfactoria a ¿qué es la vida? requiere una «teoría científica general de la naturaleza de los sistemas vivientes» de la que carecemos. Sin esa teoría, definir la vida sería un problema análogo al de los científicos del siglo xvi, que intentaban definir el agua antes de la existencia de la teoría molecular. Lo mejor que podían hacer era identificarla mediante sus características sensibles: incolora, inodora... pero ninguna de ellas (algo cambiantes, además) revelaba que el agua es H_2O .

¿Una definición negociable?

El problema es que no hay garantía de que se alcance tal teoría en el caso de la vida en general. La eventual vida en sentido amplio quizás no sea una «clase natural», tal como lo es el agua; es decir, el tipo de cosa que pueda caracterizarse mediante un conjunto de propiedades necesarias y suficientes. Si es así, la definición no sería más que una cuestión de elección lingüística, «negociable». Tal vez acordaríamos qué es lo que se va a considerar como vivo y qué es lo que no, pero sin ninguna base objetiva en la naturaleza que sustentara tal distinción.



De la misma manera que la teoría molecular permitió caracterizar inequívocamente el agua, la teoría de los sistemas vivientes daría una respuesta precisa a qué es la vida.

surge, en cambio, al reflexionar sobre la vida, no tal como la conocemos o como era, sino tal y como «puede ser».

Así, si queremos buscar vida en otros lugares del universo, o deseamos construir otras formas de vida (como pretende la *biología sintética*), las definiciones o acotaciones se hacen muy convenientes y hasta necesarias. Incluso pueden requerirse para afrontar serios problemas éticos. Aunque todos tengamos una concepción intuitiva de lo que es la vida, y pensemos que es similar a la que tienen otras personas, basta intentar enunciarla para ver cómo se desvanecen las ilusiones: ni somos capaces de precisar la intuición, ni esta es tan compartida.

De entrada se nos abren cuatro posibilidades. La primera es que la vida —o los seres vivos— tiene un conjunto de propiedades que por separado pueden encontrarse fuera de ella («propiedades múltiples no exclusivas», figura 5a). Por ejemplo, el metabolismo, la reproducción, la autoorganización, etc., son propiedades que podemos hallar en los cristales, el fuego y otros entes y fenómenos no vivos. Las definiciones sustentadas sobre esta idea se acercan al concepto popular de lo que es la vida.

La segunda posibilidad presume que hay una propiedad esencial que define, de forma necesaria y suficiente, a un ser vivo («propiedad única exclusiva», figura 5b). La tercera alternativa es la de «propiedades múltiples exclusivas» (figura 5c), según la cual puede haber más de una propiedad que comparten to-

dos los seres vivos, y solo ellos, por lo que basta encontrar una para identificarlos. Es la que, de hecho, funciona con la vida que conocemos en la Tierra. Por último (figura 5d), puede que haya distintas formas de vida sin nada en común entre ellas.

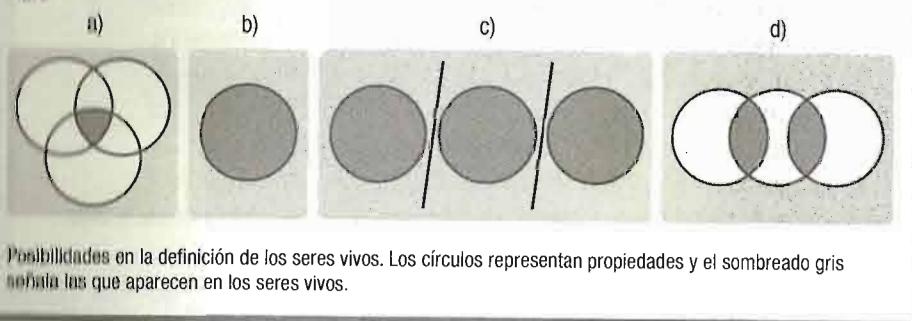
Cuando se ha realizado alguna búsqueda de vida fuera de la Tierra, la adopción de algún criterio ha sido ineludible, así que podemos fijarnos en qué asunciones explícitas o implícitas se han seguido sobre lo que es la vida.

La vida como metabolismo

En 1976, a pesar de resultados parcialmente positivos obtenidos en los experimentos en Marte de las sondas Viking de la NASA, se dijo que no podía haber vida en las muestras analizadas porque carecían de materia orgánica. Por tanto, se estaba asumiendo que la vida requiere esa materia, aunque nadie afirmara que su mera presencia significa vida: sería una condición necesaria, pero no suficiente. ¿Qué buscó la NASA como prueba suficiente de vida en Marte? Un metabolismo similar al de algunos organismos terrestres, que suponía cierto manejo bioquímico del carbono y el oxígeno. Si aceptamos que los resultados fueron en conjunto negativos (algo que más adelante discutiremos), no significa que no hubiera vida en las muestras analizadas, sino que no había el tipo de vida que se buscó.

Cabe argumentar que la definición o caracterización de la vida ha de ser más general, por lo que tal vez no se debería exigir la presencia de ningún componente material concreto, como la materia orgánica. Lo contrario sería lo que algunos llaman, siguiendo al astrónomo y divulgador científico estadounidense Carl Sagan (1934-1996), un «chauvinismo del carbono». En el mismo sentido, cabría hablar de un «chauvinismo del agua», etc. Si hacemos caso de esta admonición, no valdrían las definiciones descriptivas que detallan los materiales. De todas formas, cabe adelantar que los chauvinismos del carbono y del agua están más justificados que el del ADN y las proteínas, o el de un metabolismo concreto.

FIG. 5



En el caso de las «definiciones metabólicas» de la vida en un sentido amplio, esta se entendería como el resultado de ciertos procesos químicos no especificados con detalle. Según la experta británica en inteligencia artificial Margaret Boden (n. 1936), precisamente lo que distingue a los seres vivos naturales de los «seres» de la vida artificial, y de los virus, es «un» metabolismo. Pero si se entiende el metabolismo como mero intercambio y uso de energía y de materia, se convierte en una propiedad compartida por procesos como los tornados y el fuego (que además, también se automantienen, crecen y reproducen), y no habría que desdeñar a los robots que solo emplean energía eléctrica y materiales inorgánicos.

Cuando rehuimos las descripciones muy concretas (como las listas de características) y consideramos solo los principios generales subyacentes (mecanismos fundamentales, dinámica, organización), estamos ante las denominadas definiciones «esencialistas», pero debemos esperar que de estas también surjan recetas suficientemente prácticas para reconocer inequívocamente la vida. A menudo, la estrategia para construir definiciones esencialistas ha consistido en abstraer las bien conocidas propiedades o características de los seres vivos estudiados, haciendo nuevos listados más o menos exhaustivos.

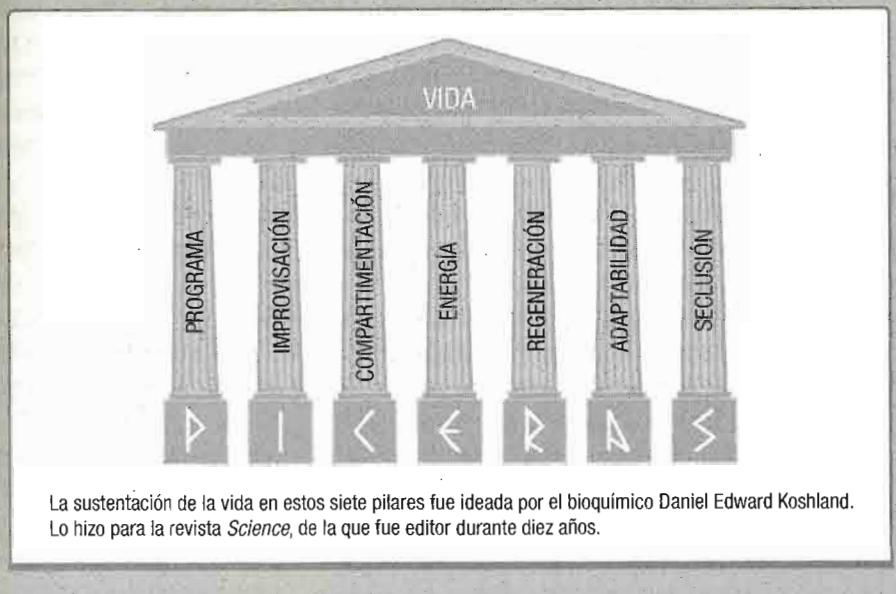
Dicho sea de paso, son caracterizaciones poco elegantes (parecen más bien unos fundamentos abreviados de biología). Y, sobre todo, poco prácticas a la hora de reconocer la vida. Al intentar contrarrestar los defectos de estos listados acortándolos, se corre el riesgo de que las definiciones se hagan excesivamente vagas o abstractas, facilitando que haya falsos positivos de vida y empeorando las posibilidades de detección. Por ejemplo, los estadounidenses Robert Shapiro (químico, 1935-2011) y Gerald Feinberg (físico, 1933-1992) dijeron que la vida es la actividad de una biosfera, de «un sistema de materia y energía altamente ordenado caracterizado por ciclos complejos que mantienen o aumentan gradualmente el orden del sistema mediante un intercambio de energía con su entorno». Con una definición tan laxa, estos autores piensan que para que se genere vida basta con que se cumplan tres requisitos: cualquier «flujo de energía

LOS «PILARES» DE LA VIDA

El premio Nobel de Medicina inglés Christian De Duve (1917-2013) caracterizó en 1991 la vida mediante siete «pilares»: manufactura de sus propios componentes, extracción de energía del ambiente, catálisis, información de procesos celulares, aislamiento, regulación y multiplicación. Y el bioquímico estadounidense Daniel E. Koshland Jr. (1920-2007), a petición de la revista *Science*, propuso en 2002 que «un organismo vivo es una unidad organizada, que lleva a cabo reacciones metabólicas, se defiende de daños, responde a estímulos, y tiene la capacidad de ser al menos un socio en la reproducción». Koshland concretó su visión en otros «siete pilares de la vida» bajo el acrónimo «PICERAS» (que asimiló a una diosa griega): Programa, Improvisación, Compartimentación, Energía, Regeneración, Adaptabilidad y Seclusión (aislamiento).

Encuadrar no es tan fácil

Hay varios problemas con estos y otros listados similares. Muchos «pilares» son parcialmente redundantes. Por ejemplo, la «catalisis» de De Duve está implicada en varios de ellos. Otro tanto podríamos decir de la «energía» o de la «regeneración» de Koshland. El «aislamiento» de De Duve y la «improvisación» y la «seclusión» de Koshland son algunos de los términos que requieren bastantes explicaciones. Por separado, no todos los pilares son exclusivos de los seres vivos. Y alguno no está en todos ellos: la «multiplicación» no se produce en los individuos estériles. Por otro lado, hasta podríamos hacer listas mixtas con similar coherencia que las originales.



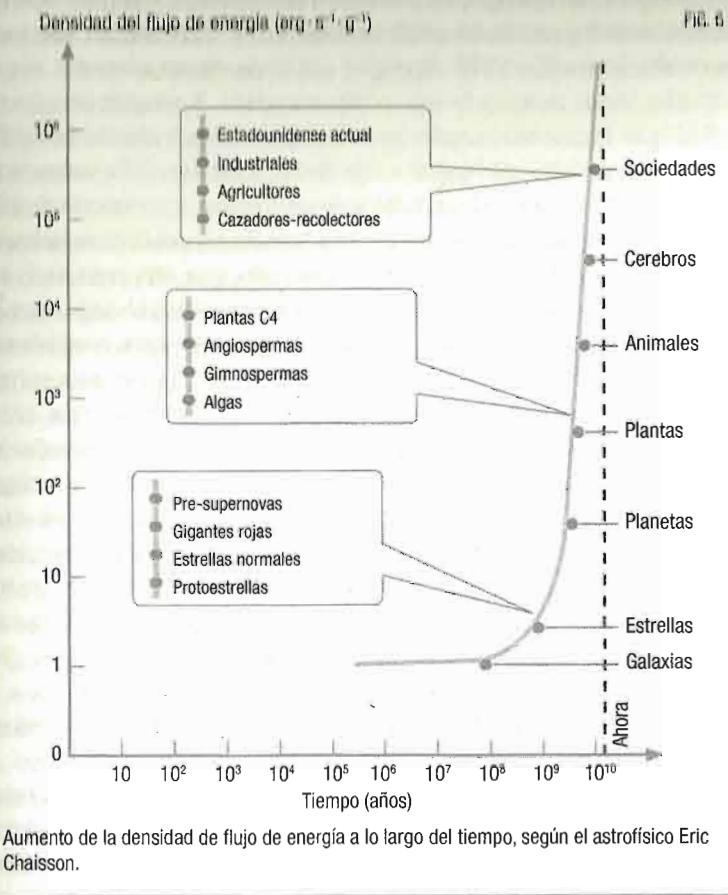
La sustentación de la vida en estos siete pilares fue ideada por el bioquímico Daniel Edward Koshland. Lo hizo para la revista *Science*, de la que fue editor durante diez años.

libre», casi cualquier sistema «material» capaz de interaccionar con esa energía y usarla para ordenarse, y suficiente «tiempo» para construir la complejidad asociada con la vida.

La vida, en el límite del caos

Esta referencia a la complejidad es interesante, pues parece claro que los seres vivos son especialmente complejos. El problema con la complejidad es que tampoco sabemos definirla de una manera inequívoca y general. Cuando se quiere cuantificar, hay que concretar qué definición se elige, lo que depende de la naturaleza del estudio. Si, como se sugiere en la definición de vida de Shapiro y Feinberg, la complejidad se liga de manera simple a la noción de orden, tenemos un problema, pues a menudo los sistemas más ordenados (como los cristales) distan de estar vivos. Los cristales minerales crean y sostienen un orden local y, además, se pueden reproducir. Algunas características del cristal, como su asimetría, o ciertos defectos, pueden pasar a la descendencia, pero no se ve la manera de que puedan transmitir información útil de cara a un proceso evolutivo. Según acostumbran a decir expertos en sistemas complejos como el biólogo teórico estadounidense Stuart Kauffman (n. 1939), la complejidad de la vida aparece «entre el caos y el orden», más bien «en el límite del caos». Pero esto también ocurre con otros sistemas complejos.

El intercambio de energía (y de materia) con el entorno significa que los seres vivos son sistemas abiertos fuera del equilibrio termodinámico. Sin embargo, no son los únicos sistemas que se autoorganizan gracias a estas características. El Nobel de Química ruso-belga Ilya Prigogine (1917-2003) explicó cómo diversos sistemas no lineales autogeneran «estructuras disipativas», que no hay que identificar con seres vivos. Si así lo hiciéramos, habría que considerar vivas, por ejemplo, a las estrellas. El astrofísico estadounidense Eric Chaisson (n. 1946) ha señalado que a lo largo de la evolución del universo han ido surgiendo sistemas con un *flujo de energía por unidad de masa* cada vez mayor. Los seres vivos alcanzan valores más altos que cualquier otro



accesorio (una «propiedad única exclusiva»), aunque ocasionalmente útil para la identificación? Para Carl Sagan esto era «la evolución». En 1970 dijo que «la vida es un sistema capaz de evolucionar mediante selección natural». Y es que, en efecto, la vida que conocemos solo se entiende como fruto de la evolución. Pero ¿es imposible que surja de otra manera? Pensemos en los previsibles logros de la *biología sintética*: ¿no admitiríamos como vivo un ente que lo pareciera a todos los efectos salvo el de su origen? Se puede responder a esto que, en realidad, los seres vivos de diseño son producidos por otros procedentes de evolución natural. Según algunos autores, deberían considerarse simples *biomarcadores* (o *biofirmas*). Tampoco se excluye en la definición de Sagan la llamada «vida artificial», es decir, entes informáticos que se replican con variaciones y «evolucionan» bajo presiones selectivas virtuales. La mayoría no acepta que eso sea vida «de verdad». Más controvertido sería el caso de robots con capacidad de reproducción (y variaciones): ¿vida «mecánica»?

Al margen de esto, un problema de cariz práctico es que reconocer que un proceso de evolución está activado no es fácil. ¿No habría que examinar un sistema durante quizás miles de años, si no mucho más?, y ¿sabríamos reconocer una evolución como la bacteriana? Podemos considerar que el reconocimiento se hace posible gracias a que se habla de un sistema «capaz de» evolución, pues para que esta se produzca basta con que haya reproducción con herencia informativa y variaciones. Pero, si se acepta esto, tal vez debería recogerse en la definición.

Por otro lado está el problema de los individuos estériles, como los mulos o los célibes. Nadie quisiera negarles su cualidad de vivos, pero no cumplen con la definición, pues ni siquiera se reproducen. De hecho, seguro que el lector o lectora, por fértil que sea, no se reproduce por sí solo. Y lo que evoluciona son las poblaciones, no los individuos. La solución puede concretarse diciendo que los seres vivos son «fruto de» la evolución (y de la reproducción), aunque ya no participen activamente en ellas.

En cambio, según la definición de Sagan, los virus sí serían seres vivos. De hecho, algunos autores así lo defienden, y recalcan

que los virus no solo son un producto de los procesos evolutivos, sino que intervienen muy activamente en ellos, probablemente desde tiempos muy remotos, y que la vida sería muy diferente sin su concurso.

Recordemos también que hay un reputado autor, el biólogo molecular escocés Graham Cairns-Smith (n. 1931), que defiende la existencia de «organismos minerales», arcillas que tienen, precisamente, la capacidad de reproducirse con variaciones, y sobre las que actuaría la selección natural propiciando la entrada en juego de los organismos carbonados. Cairns-Smith no pide que se las consideren seres vivos, pero si se acepta la definición evolutiva habría que hacerlo.

En definitiva, aunque la evolución esté íntimamente ligada al desarrollo de la vida, no parece suficiente ni útil para su reconocimiento. Los problemas parecen provenir de que estamos ante una definición que se refiere a una propiedad colectiva y de carácter histórico de los seres vivos, de modo que nos preguntamos ¿hay una capacidad esencial que caracterice a los seres vivos individuales?

Un sistema que se automantiene... ¿Eso es la vida?

Según muchos autores, el rasgo esencial de un ser vivo es la capacidad de mantener su individualidad. Los biólogos chilenos Humberto Maturana (n. 1928) y Francisco Varela (1946-2001) han sido quienes han defendido este enfoque de manera más destacada, para el cual acuñaron el neologismo «autopoiesis». Fue en 1973 cuando identificaron un ser vivo con un sistema «autopoietico». Así, pues, la autopoiesis sería la propiedad esencial que define, de forma necesaria y suficiente, a un ser vivo. Varela dijo en 2000 que «un sistema autopoietico está organizado (esto es, se define como una unidad) como una red de procesos de producción (síntesis y destrucción) de componentes, en forma tal que estos componentes: 1) se regeneran continuamente e integran la red de transformaciones que los produjo; 2) constituyen al sistema como una unidad distingible en su dominio de existencia».

La caracterización tal vez sea demasiado abstracta, hasta el punto de que no desecha la vida artificial. Pero para diversos autores, lo peor de la visión de Maturana y Varela es que elude los aspectos evolutivos de la vida, los que hacen hincapié en la reproducción, la herencia y las propiedades colectivas y ecológicas.

La necesidad de conciliar las dos perspectivas se aprecia claramente en los estudios sobre el origen de la vida. Para conseguir su aparición se busca integrar metabolismo y reproducción, o lo que es lo mismo, redes de reacciones que sostienen el sistema (mediante autocatálisis y sistemas de control), junto con el empleo de moléculas que transfieren información entre generaciones de manera «imperfecta».

Y la NASA, ¿qué opina?

En 1994 la NASA intentó recoger los pares de aspectos (individual y colectivo, actual e histórico, metabólico y evolutivo) cuando adoptó como nueva definición «de trabajo» de la vida la que acababa de proponer el biólogo molecular estadounidense Gerald Joyce (n. 1956), que a su vez ampliaba la de Sagan: un ser vivo es «un sistema químico autosostenido capaz de experimentar evolución darwiniana».

A pesar del avance que esta definición representa frente a otras anteriores, no deja de tener inconvenientes. Lo primero que choca es que esa definición se considere «de trabajo», pues, por todo lo que ya comentamos antes sobre la planteada por Sagan, se ve muy difícil de aplicar en la exploración espacial. De hecho, la propia NASA no la aplica.

En segundo lugar, ¿la evolución debe ser necesariamente *darwiniana*? ¿No cabe imaginar otra posibilidad, como una evolución *lamarckiana*, en la que se hereden caracteres adquiridos? En las primeras fases de la vida en la Tierra pudo funcionar una evolución con un importante componente lamarckiano, cuando el ARN presuntamente hacía todo el trabajo importante, y las mutaciones que afectaban a sus capacidades también se

heredaban, de modo que no existía la diferencia posterior entre *genotipo* (el conjunto de la información genética) y *fenotipo* (la expresión de esa información). ¿Unos sistemas así, con toda una serie de capacidades metabólicas, de relación... y de evolución, no merecen ser considerados vivos?

También es digna de tener en cuenta la opinión de los defensores del llamado «metabolismo primero», según la cual quizás hubo en el origen de la vida una época de reproducción sin replicación, en la que habría evolución, pero de nuevo no darwiniana.

La propuesta de la NASA sí resuelve el problema de los virus, que participan de la evolución darwiniana pero carecen de autosostenibilidad. Sin embargo, esta no es todo o nada. ¿No consideramos vivas a las células parásitas a pesar de su gran dependencia? Y de nuevo nos vemos con el caso del fuego que, aunque no sería vivo por carecer de evolución darwiniana, sí es autosostenible. Algunos echan en falta, además, alguna mención de la organización y el metabolismo que posibilitan la autosostenibilidad de la vida.

¿Podríamos integrar la definición evolutiva y la de Maturana y Varela mejor de como lo hizo la NASA? Quizás diciendo que un ser vivo es «un sistema material autopoietico, producto inmediato o secundario de la evolución por selección natural». Pero claro, la brevedad de esta definición se basa en todo lo que significa «autopoietico». De modo más explícito podríamos proponer que un ser vivo es «una red material semiabierto al medio, de procesos catalíticos fuera de equilibrio y controlados, que se autolimita y autorregenera, y es producto inmediato o secundario de la evolución por selección natural».

Así, la autopoiesis se recoge como rasgo esencial de los individuos vivos, pero afirmando su naturaleza material, que excluye a la vida artificial; se prefiere hablar de un sistema «material» a uno «químico» para no descartar de entrada a los sistemas que pueden estar más sustentados en la física que en la química. Y se resalta —frente a las definiciones de Sagan, la NASA y otros—

Hay un número infinito de mundos, algunos como el nuestro, otros diferentes.

EPICURO

que el ser vivo es «producto» de la selección, en vez de «capaz de» ella, con lo que se resuelve el problema de los estériles. El producto puede ser inmediato (los seres vivos conocidos hoy) o secundario, lo que recoge los eventuales resultados positivos de la biología sintética y la robótica. La propuesta no está libre de problemas; seguro que el lector puede encontrarlos y hacer sus propias aportaciones.

EL RECONOCIMIENTO DE LA VIDA

Como hemos ido viendo, de cara al reconocimiento de cualquier tipo de vida las definiciones que se ofrecen son en exceso concretas (y propician falsos negativos) o demasiado abstractas (que favorecen falsos positivos). Es decir, no hay «algo» sencillo que baste para reconocer la vida —lo que llamamos un *biomarcador*— cuya ausencia sirva para desechar su existencia.

Hay biomarcadores muy inequívocos, pero solo para la vida de tipo terrestre, no para «toda» la vida posible. Es decir, en general podremos estar más seguros al afirmar que hay vida que al negarlo. Veamos en qué puede basarse el diagnóstico.

La detección *in situ*

Solo *in situ* es posible el reconocimiento directo, que se resringe a la exploración del sistema solar. Identificar vida de tipo terrestre sería trivial. Bastaría encontrar «alguna» de sus características «exclusivas» (como el ADN, las proteínas, etc.). También valdría, claro está, alguna peculiaridad distintiva o producto de la actividad de «ciertos» seres vivos (por ejemplo, una pluma). Incorporamos las evidencias de tecnologías más o menos simples o avanzadas (como un termómetro o un reloj). La lista incluiría formas o estructuras, moléculas biogénicas (compuestos quirales, macromoléculas...), ciertas relaciones de isótopos (átomos de un mismo elemento químico con distinta masa) y determinados comportamientos o procesos.

Con todas las posibles pruebas hay que ser preavidos. Respecto a las morfologías, hoy sabemos, gracias a los trabajos realizados con *biomorfos* por Juan Manuel García Ruiz (n. 1953), profesor de investigación en el Laboratorio de Estudios Cristalográficos del CSIC, en Granada, que las formas celulares y filamentosas, e incluso otras más sofisticadas, no son exclusivas de la vida; se debería analizar la estructura interna, comprobar la existencia de membranas u orgánulos, etc. Si, como ocurre con muchas formas supuestamente fósiles, esto no es posible, puede que se necesiten más pruebas que las morfológicas.

Vislumbrando en la lejanía

A distancia, será casi imposible reconocer la vida de modo que se ajuste a las mejores definiciones propuestas. ¿Cómo certificar la existencia de evolución biológica, de sistemas autopoéticos, etc.? Para proponer biofirmas hay que recurrir, mal que nos pese, a las definiciones que llamábamos «clasificadoras». Durante el reconocimiento de una hipotética forma de vida, tendremos que conformarnos, generalmente, con algunas de las características adjudicadas a los seres vivos y a la vida, y quizás estas no nos den siempre seguridad.

Naturalmente, no se deben crear falsas expectativas con la mera presencia de alguna de las «condiciones» para que surja la vida, como los llamados *geoindicadores*. Eso ocurre, por ejemplo, cuando se proclama la simple existencia de agua líquida como casi una prueba de vida. El eslogan de la NASA «sigue el agua» tiene sentido solo en la búsqueda de requisitos necesarios para la existencia de vida como la que conocemos, pero no es un criterio «suficiente». Tampoco lo es la mera detección de moléculas orgánicas, ni siquiera de compuestos «biológicos» sencillos como los aminoácidos, de muy posible origen abiótico (como los que nos llegan, y con cierta abundancia, en algunos meteoritos).

El biomarcador más ostensible a nivel planetario desde la distancia puede ser el alejamiento del equilibrio característico de la vida, sobre todo el que afecte a las atmósferas. El distanciamien-

to del equilibrio es necesario para la aparición de la vida, pero una vez que esta se establece, el «tipo» de alejamiento puede ser peculiar (por ejemplo, determinadas «relaciones» de concentraciones de gases). Los niveles altos de orden (bajos de entropía, si podemos estimarla) pueden ser sugerentes de vida, pero no definitivos. Y, desde luego, puede haber vida (sobre todo si es subsuperficial) que no deje huellas notables en la atmósfera.

Lo que está claro es que antes de buscar vida conviene plantearse qué posibilidades puede haber, qué tipos de vida cabe esperar.

¿Qué tipo de vida?

La vida que conocemos, basada en el funcionamiento de ácidos nucleicos y proteínas, ¿es la única posible? Puede que existan otras formas de vida basadas en el carbono, el oxígeno, el nitrógeno... o sustentadas en la química de otros elementos y en disolventes distintos del agua.

¿Qué se necesita para que se desarrolle vida en alguna parte del universo? La primera idea —y tal vez la mejor— es que la vida puede surgir en otros planetas similares a la Tierra. Desde que triunfó la hipótesis heliocéntrica frente a la que consideraba la Tierra el centro del universo, ha prevalecido el llamado *principio de mediocridad* o *principio copernicano*, según el cual lo que nos rodea no tiene nada de especial y es común en el universo. De ser así, cabe esperar una infinidad de «tierras», con vida en muchas de ellas.

Además, diversos autores defienden que la vida no tiene por qué ser tal como la conocemos, sino que hay otras posibilidades. En definitiva, para muchos la vida debe ser muy común en el universo; según el Nobel de Medicina británico Christian de Duve, la vida es un «imperativo cósmico».

Sin embargo, otros son más pesimistas, y piensan que para que evolucione la vida, y sobre todo algo parecido a la especie humana, no basta un entorno parecido, pues se han dado toda una serie de circunstancias favorables muy improbables. Otro Nobel de Medicina, el francés Jacques Monod (1910-1976) escribió que «el hombre sabe al fin que está solo en la inmensidad indiferente del universo, de donde ha emergido por azar».

Para tener criterios racionales en estas controversias, hay que considerar cuáles son los requisitos para la aparición de la vida.

UN NECESARIO DESEQUILIBRIO VITAL

Sabemos que la vida, sea de tipo terrestre o no, solo puede desarrollarse en un entorno fuera del equilibrio termodinámico. Esto equivale a decir que necesita una fuente de energía. Desequilibrios y fuentes de energía no faltan en el universo. Los más prominentes dependen de las estrellas. De hecho, la mayor parte de la vida en la Tierra es tributaria de los fotones solares que tras ser capturados generan un desequilibrio químico en los organismos que comienzan la cadena trófica.

Pero también tenemos los desequilibrios geotérmicos y químicos asociados al vulcanismo y la tectónica de placas. Por lo que a la vida concierne, se manifiestan de manera destacada en las surgencias conocidas como fumarolas negras. Recordemos la abundancia de organismos en estos ambientes carentes de energía solar, y la posibilidad de que la vida terrestre haya nacido en ellos.

De una forma u otra, la lejanía del equilibrio genera flujos de energía, y los seres vivos son especialmente eficaces en disiparlos. Como ha destacado Eric Chaisson, los organismos consiguen que pase a través de ellos un gran flujo de energía por unidad de masa, muy superior, sorprendentemente, al que transita por las estrellas (véase la figura de la pág. 31).

Los seres vivos, entre el aislamiento y la apertura

El desarrollo de la vida en la Tierra ha dependido de la evolución mediante selección natural; no sabemos imaginarnos otra forma de alcanzar la complejidad de la vida. La selección natural actúa mediante la reproducción diferencial de «individuos» con diferentes capacidades adaptativas en su medio. Así pues, es esencial la individualización, y esta solo se consigue mediante un adecuado aislamiento del entorno, que depende de las mem-

branas celulares. Adecuado significa suficiente, pero no absoluto, pues los seres vivos, para mantenerse ordenados fuera del equilibrio, necesitan un continuo intercambio de materia y energía con el medio, es decir, ser sistemas abiertos.

¿Sería posible el desarrollo de una vida no basada en la individualización? Aunque algunos autores de ciencia ficción la hayan imaginado, nadie ha sido capaz de proponer un mecanismo verosímil, ni siquiera aproximado, para conseguirla.

La lejanía del equilibrio y la celularización que conocemos se basan en la química del carbono, pero ¿no caben otras posibilidades? Más concretamente, ¿no existirán bioquímicas alternativas sobre las que se sustenten otras biologías?

Vida y complejidad química

Asociamos la vida (al menos la «natural») con una «complejidad química» a temperatura «moderada». Esta complejidad se basa en la reactividad del carbono, pero no ignoremos de antemano que pueden existir otras posibilidades capaces de generar una variedad y potencialidad equiparables. No se trata solo de disponer de moléculas complejas, sino de que puedan almacenar información de cara a sustentar una evolución mediante selección natural, y mostrar actividades suficientemente específicas y precisas.

Para todo ello se requieren moléculas grandes en al menos una dimensión. Parece que no hay más salida que la de recurrir a polímeros lineales (como el ARN), láminas u ordenaciones tridimensionales. Además, el almacenamiento de información requiere que las moléculas incluyan características variables que no destruyan el conjunto.

Si queremos encontrar una alternativa a la química del carbono, debe ser otra basada en elementos abundantes, y con al menos alguno de ellos capaz de enlazarse consigo mismo, o con varios otros, para formar grandes moléculas complejas y estables.

De entre los 91 elementos naturales, nos interesan los que además de estables sean capaces de formar como mínimo tres enlaces covalentes (fuertes y no iónicos). Dos se necesitan para que

el elemento pueda unirse consigo mismo o con otros, formando largas cadenas ($-X-X-X-\dots$) o anillos; los restantes, para unirse con otros elementos que introduzcan variedad y, con ello, posibilidades de información. Solo nueve elementos satisfacen los requisitos. Con tres enlaces: boro (B), nitrógeno (N), fósforo (P), arsénico (As) y antimonio (Sb). Con cuatro enlaces: carbono (C), silicio (Si), germanio (Ge) y estaño (Sn). Además, hace falta una abundancia mínima; en el universo, como muestra la tabla, el C, el N y el Si predominan sobre el resto de los citados. En la corteza terrestre destaca el Si, y muy detrás P y C. En la hidrosfera, el C. En la atmósfera, N y C.

De todos ellos, el carbono es el que posee la mayor capacidad para formar enlaces covalentes consigo mismo y con otros en unas condiciones «suaves». Uniéndose a otros átomos forma las larguísima y muy estables (pero flexibles) cadenas de proteínas y ácidos nucleicos. Estos últimos se caracterizan por tener un esqueleto con muchas cargas negativas (polianiónico), clave para

Número atómico	Símbolo	Elemento	Universo (%)	Tierra (%)	Corteza (%)	Océano (%)	Troposfera (%)	Seres vivos (%)
1	H	Hidrógeno	92,47	0,7	0,14	66,2	NS	61
2	He	Helio	7,40	NS	NS	NS	NS	NS
8	O	Oxígeno	0,06	48,2	46,6	33,1	24	26
6	C	Carbono	0,04	0,2	0,2	0,001	0,01	10,5
7	N	Nitrógeno	0,01	0,005	0,002	NS	75	2,4
14	Si	Silicio	0,005	15,0	27,7	NS	NS	NS
12	Mg	Magnesio	0,004	16,4	2,1	0,033	NS	0,011
26	Fe	Hierro	0,003	14,8	5,0	NS	NS	0,01
16	S	Azufre	0,002	0,5	0,02	0,017	NS	0,13
15	P	Fósforo	0,00003	0,1	0,1	NS	NS	0,13

Estimaciones de la abundancia promedio de algunos elementos, en proporción de átomos. (NS: no significativo o trazas.)

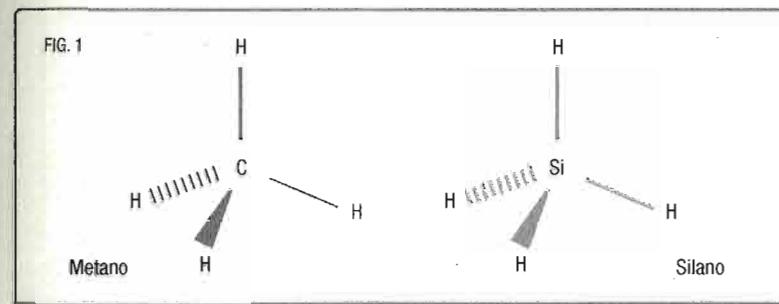
que se mantenga extendido y no se agregue en exceso sobre sí mismo. Gracias a él, los cambios en las bases de los nucleótidos (cuya secuencia determina la información genética) son casi indiferentes para la estructura del ADN. Por eso es de esperar que cualquier genética extraterrestre se base en polímeros con un esqueleto en el que se repitan las cargas negativas o las positivas.

Por el contrario, las moléculas catalíticas —las proteínas— sí interesa que se plieguen. Para eso es muy adecuado también su esqueleto, no cargado sino con dipolos que tienden a asociarse.

¿VIDA BASADA EN EL SILICIO?

Al margen del carbono, solo el silicio parece capaz de generar un buen andamiaje de enlaces covalentes. Al estar bajo el carbono en la misma columna de la tabla periódica, tiene el mismo número de electrones (4) en su capa externa. Estos electrones intervienen en las reacciones químicas, y los de ambos elementos tienen propiedades (como la moderada electronegatividad) similares. El silicio, además, es abundante, a diferencia de los otros elementos de la misma columna de la tabla —germanio (Ge), estaño (Sn) y plomo (Pb)—, que, por su mayor tamaño, difieren mucho más del carbono y del silicio en sus propiedades.

Lo mismo que el carbono, el silicio puede unirse mediante enlaces covalentes a otros cuatro átomos, incluidos otros de Si. Así, mientras el C se une a cuatro átomos de H formando el metano (CH_4), el Si hace lo mismo formando el silano (SiH_4) (figura 1).



Además, en la corteza terrestre el silicio es el segundo elemento en abundancia, como muestra la tabla de la pág. 44, muy por delante del carbono, algo parecido a lo que pasa en otros cuerpos rocosos del sistema solar. ¿Cómo es que, a pesar de esto, la vida se basa en el carbono y no en el silicio?

Para empezar, el enlace Si-H es mucho más reactivo que el C-H, por lo que el silano es mucho menos estable que el metano. Cuando se unen más átomos de carbono e hidrógeno se forman hidrocarburos, mientras que con silicio e hidrógeno se obtienen silanos o polisilanos. Sin embargo, hidrocarburos y polisilanos tienen propiedades muy distintas. Los polisilanos son menos estables porque los enlaces Si-Si son menos fuertes que los C-C, como se comprueba en la tabla de esta página; para que no se rompan los Si-Si, la temperatura ha de ser muy baja, y mejor si la presión es alta. Además, los enlaces Si-Si son mucho más sensibles que los C-C a los ácidos, las bases y la luz. Por todo eso, mientras que es muy fácil obtener largas cadenas de átomos de carbono, no lo es con los de silicio, y los polisilanos son muy escasos en la naturaleza.

La afinidad del silicio por el oxígeno hace que este descomponga fácilmente los silanos; de hecho, estos muestran *pirofijeza*: se inflaman en presencia de aire espontáneamente, sin necesidad de una fuente de ignición. La fuerza del enlace Si-O

Átomos	Con silicio	Con carbono
Hidrógeno	393	435
Oxígeno	452	360
Nitrógeno	322	305
Cloro	381	351
Carbono	360	368
Silicio	340	360

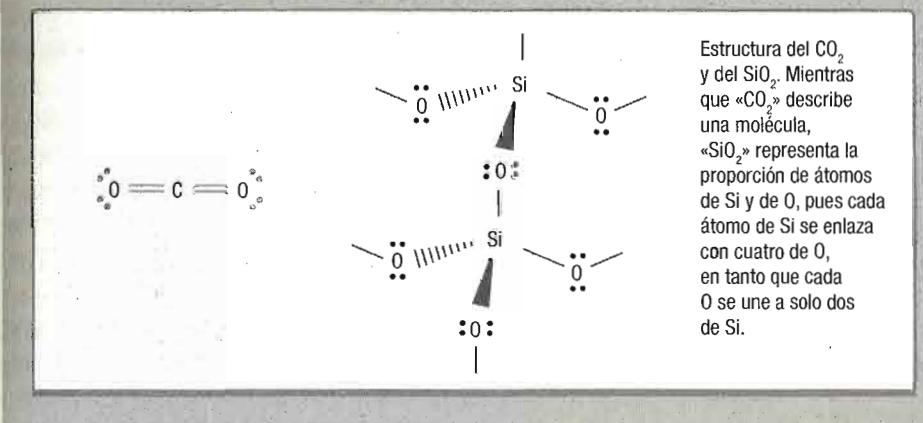
Energías de enlace típicas del C y del Si (en kJ/mol).

LOS DOBLES ENLACES DEL SILICIO

Una característica esencial de la química del carbono respecto a la vida es su capacidad de formar dobles (sobre todo) y triples enlaces. Pues bien, tales enlaces están casi ausentes de la química del silicio. Mientras que el doble enlace C=O es crucial en la bioquímica, el Si=O no aparece en compuestos estables. Esto determina que no puedan existir análogos con silicio de los ácidos nucleicos, proteínas, carbohidratos, etc. El dióxido de carbono (CO_2 , o $\text{O}=\text{C}=\text{O}$), clave en los ciclos biológicos (pensemos en su uso durante la fotosíntesis) tendría en el silicio un análogo (SiO_2 , o $\text{O}=\text{Si}=\text{O}$) que prácticamente no existe. Sabemos que el cuarzo tiene la fórmula SiO_2 , que así parece análogo al CO_2 . Pero no lo es, pues SiO_2 no describe una molécula con esa composición atómica, sino que representa la abundancia relativa de los átomos de Si y O en el cuarzo, como muestra la figura. En resumen, la incapacidad del silicio para formar dobles enlaces lo inhabilita para reacciones semejantes a las que, basadas en el carbono, sostienen la vida que conocemos.

Fórmulas semejantes, estructuras muy diferentes

Como cabe esperar, el SiO_2 tiene propiedades muy distintas a las del CO_2 . Este es gaseoso por encima de $-78,5^\circ\text{C}$ (a presión atmosférica) y es muy soluble en agua. Por el contrario, el SiO_2 es casi insoluble en agua y solo es un gas muy por encima de $2\,000^\circ\text{C}$. Son más fáciles de romper los enlaces del CO_2 que los del SiO_2 . Este es muy inerte, inútil como intermediario metabólico en procesos biológicos. Es clave que los enlaces Si-O sean más fuertes que los Si-Si, mientras que los C-C y C=O son de fuerza similar. Siendo el oxígeno el tercer elemento más frecuente en el universo, cabe esperar que el silicio se vea habitualmente en presencia de O, y no nos sorprende que más del 80% de la corteza terrestre se componga de diversas combinaciones de O y Si. De hecho, algunos apuntan que la vida basada en el carbono pudo surgir en la Tierra porque el corrosivo oxígeno estaba atrapado precisamente por el silicio. En un ambiente rico en oxígeno, el silicio lo enlazará con mucha más avidez que el carbono y se convertirá rápidamente en su forma mineral inerte.



actúa, en definitiva, en contra del uso de las cadenas de silicio como moléculas biológicas.

Una bioquímica basada en los silanos exigiría un ambiente sin oxígeno y disolventes como nitrógeno, etano u otros, pero no agua. Eludiendo al oxígeno, los silanos pueden formar ensamblajes macromoleculares flexibles. Su estabilidad decrece al aumentar la longitud, pero en menor medida si se sustituye el hidrógeno con grupos orgánicos (carbonados), y así se han conseguido polisilanos de gran tamaño. Los *anfipáticos* (con cargas, o polares, por un extremo; sin cargas, o apolares, por el otro) se autoagregan exponiendo sus zonas polares («hidrófilas») a las cargas opuestas del agua y crean vesículas, tan importantes de cara a la delimitación de estructuras celulares.

Algunos autores especulan con polisilanos como equivalentes de los ácidos nucleicos en un «mundo del silicio». La información residiría en la naturaleza de las cadenas laterales, que harían el papel de las bases de los ácidos nucleicos. Pero las pruebas a favor son muy escasas.

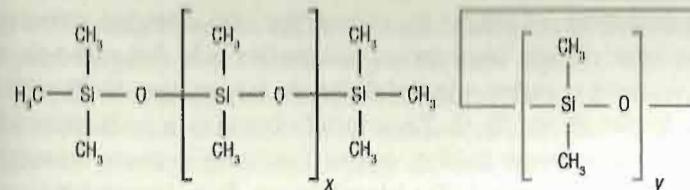
Volvamos a la asociación del silicio con el oxígeno, pues hay otra posibilidad más esperanzadora. Al fin y al cabo, los polímeros biológicos críticos (ácidos nucleicos y proteínas) no tienen esqueletos $-C-C-C-\dots$, sino de C unidos a otros átomos, como O, N y P.

Unos interesantes compuestos orgánicos de silicio: los siloxanos

Los llamados *siloxanos* poseen una cadena principal -Si-O-Si-O-... y, mediante enlaces Si-C, cadenas laterales orgánicas (figura 2). El nombre de siloxano procede de *silicio*, *oxígeno* y *alcano*. A diferencia de los silanos, sí que son estables, y de hecho están presentes en multitud de productos cotidianos (cosméticos, aislantes, aditivos alimentarios...).

Los siloxanos más conocidos —como las siliconas— parecen demasiado inertes para sustentar vida, pero otros podrían conformar moléculas informativas gracias a la diversidad de cadenas laterales, de modo análogo a como antes decíamos de los

1022



Siloxanos lineales y cíclicos.

polisilanos, y a lo que podría darse en los polímeros de silicio y nitrógeno. Pero en todos los casos falta apoyo experimental y, de todas formas, esos polímeros sustentarían sistemas considerablemente menos complejos que los de carbono.

En la superficie terrestre predominan los silicatos, que son muy inertes, pero los reputados Gerald Feinberg y Robert Shapiro propusieron que podrían existir organismos basados en ellos en los flujos de lava y en el magma, a los que llamaron *lavobios* y *magmobios*, respectivamente. La información necesaria para la vida residiría en las irregularidades de sus mallas cristalinas. Pero sin respaldo experimental ni teórico, la especulación es muy gratuita.

En resumen, un mundo en el que el silicio constituya una mejor posibilidad para la vida que el carbono debería impedir el éxito de este, y ser escaso en oxígeno y agua. Sería extremadamente frío (con disolventes como metano), o bien —con mucha menos verosimilitud— tan caliente que los disolventes serían minerales fundidos. En cualquiera de esas temperaturas extremas, una química pro-biológica parece mucho menos probable que la conocida del carbono. De hecho, los silanos y otros polímeros complejos de silicio son raros en los meteoritos y otras localizaciones interestelares, salvo en el disco protostelar W33A, localizado en la constelación de Sagitario, a 12 000 años-luz de la Tierra. La química del carbono parece ser, en cambio, ubicua en el cosmos. Se han identificado un centenar de moléculas orgánicas, mientras que las que contienen

silicio no llegan a la decena. De estas, la mitad incluye también carbono.

En definitiva, el silicio no se percibe con claridad como elemento base de una bioquímica alternativa a la del carbono, debido, en primer lugar, a la debilidad de los enlaces Si-Si y Si-H, y a la fuerza de los Si-O. En segundo lugar, por su incapacidad para formar enlaces dobles, lo que limita de manera dramática sus eventuales capacidades bioquímicas. Y en tercer lugar, porque no existe una molécula equivalente al CO₂. Sin embargo, el silicio sí que puede auspiciar procesos biológicos... basados en el carbono.

El silicio como asistente del carbono

Aunque el silicio no sirva como elemento básico sustentador de vida como lo es el carbono en la Tierra, sí puede tener una importancia poco reseñada en la prosperidad de la vida carbonada. Es muy conocido que muchas reacciones de interés probiótico ocurren mucho mejor en presencia de arcillas (silicatos) en un medio acuoso. Ya vimos que Cairns-Smith propuso que los organismos de arcillas pudieron dar paso a la vida orgánica. Más recientemente, Martin Brasier sugirió que los silicatos en forma de piedra pómez pueden constituir una localización excelente para el origen de la vida por su alta relación superficie-volumen, su flotabilidad en agua, y su notable capacidad para adsorber compuestos orgánicos, fosfatos, metales... y catalizadores como las *zeolitas* (otros minerales microporosos de silicatos).

Por otro lado, el silicio se encuentra en muchos organismos, a los que proporciona rigidez estructural; por ejemplo, en los tallos de las plantas, los huesos de los animales y los esqueletos de las diatomeas y equinodermos.

Nos quedamos, por tanto, con el carbono (con esa inestimable ayuda del silicio) y mantenemos como opción poco probable el silicio. ¿En qué medio líquido? El que conocemos como idóneo para la vida es el agua, pero ¿hay alternativas verosímiles para otra química del carbono o del silicio?

LOS DISOLVENTES DE LA VIDA

Sabemos muy bien que las reacciones químicas necesarias para la vida se producen mucho mejor en fase líquida. En fase gaseosa, las reacciones se limitan a las sustancias suficientemente volátiles, es más improbable su encuentro y se hace más difícil mantener juntos los componentes de una estructura compleja. En fase sólida, la difusión es lentísima, y las posibilidades de encuentros moleculares también son demasiado reducidas. La vida se antoja, pues, muy improbable en un medio sólido o gaseoso. Pero sí que resultan de mucho interés las interfasas líquido-sólido (roca) y líquido-gas.

La eficacia del agua para la vida es evidente, pero no desdenemos de entrada posibles alternativas. El papel de la base líquida es ser disolvente y transportadora de una variedad de nutrientes y otros compuestos implicados en el metabolismo. No hay muchas sustancias que sean buenos disolventes y suficientemente abundantes en algún ambiente cósmico; por esta última razón eliminamos de entrada compuestos como los de flúor y fósforo. A temperaturas no muy diferentes a las nuestras, destacan el agua, la formamida (HCONH₂) y el ácido sulfúrico. A más baja temperatura, metano, etano, nitrógeno líquido y amoniaco. A temperaturas elevadas, podemos considerar como fase líquida la sílice o silicatos fundidos.

Lamentablemente, tenemos muy pocos datos experimentales sobre las posibilidades de sistemas vivientes en disolventes distintos al agua. Pero un importante criterio de discriminación se basa en la conveniencia de que el disolvente sea líquido en un amplio rango de temperaturas, para evitar su pérdida (por congelación o evaporación) en los eventuales cambios meteorológicos y climáticos. Como vemos en la tabla de la página siguiente, en este sentido destacan, por encima del agua, y a temperaturas similares y superiores, la formamida y el ácido sulfúrico. A más altas temperaturas, la sílice, y a bajas, el etano. En realidad, el agua es líquida solo en una pequeña fracción de los ambientes cósmicos; lo más frecuente es que esté helada, aunque a bajas temperaturas pueden funcionar las mezclas de agua y amoniaco.

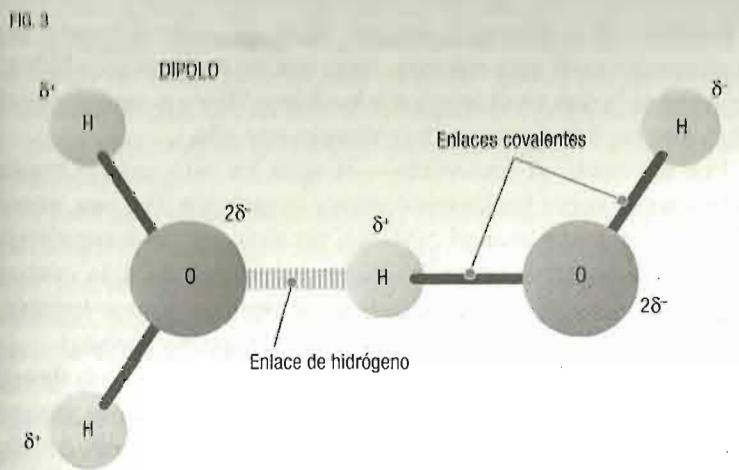
Sustancia	Temperatura de congelación (°C)	Temperatura de ebullición (°C)	Rango líquido
Nitrógeno (N_2)	-210	-196	14
Metano (CH_4)	-182	-164	18
Amoniaco (NH_3)	-78	-33	45
Etano (C_2H_6)	-183	-89	94
Agua (H_2O)	0	100	100
Formamida ($HCONH_2$)	2,5	210	207,5
Ác. sulfúrico (H_2SO_4)	10	337	327
Silice (SiO_2)	1713	2230	517

Puntos de congelación y de ebullición a 1 atm de presión para sustancias que podrían servir de medio líquido para la vida. A distintas presiones y con diversas sustancias disueltas, los intervalos son diferentes.

Merece resaltarse que la velocidad de una reacción química se duplica aproximadamente con cada incremento de 10 °C. Dado que cualquier origen de la vida probablemente requiere muchas reacciones químicas, y quizás muchos ensayos y errores, puede ser clave que la temperatura las facilite. Sin embargo, las temperaturas demasiado altas desestabilizan muchas estructuras, como las proteínas y los ácidos nucleicos; por eso no se espera que ningún organismo terrestre pueda vivir a más de unos 150 °C.

El agua, el top de los disolventes

Las propiedades por las que el agua desempeña un papel esencial para la vida en la Tierra provienen de que su molécula es un dipolo en el que el oxígeno queda con una carga parcial negativa, y los hidrógenos positiva. Esa polaridad favorece que se establezcan «puentes» o enlaces de hidrógeno entre las moléculas de agua (figura 3), o de estas con otras.



Formación de un puente de hidrógeno entre dos moléculas de agua. δ^+ y δ^- representan cargas parciales positivas y negativas, respectivamente.

Estos puentes son los responsables de que el agua sea tan buen «estabilizador de la temperatura» y de que se expanda al congelarse, al revés que la mayoría de las sustancias, que se contraen. Esto es útil para crear suelo a partir de rocas, pues el agua infiltrada, al congelarse, ayuda a romperlas. Pero lo más relevante es que el hielo flota, lo que dificulta la congelación total de grandes volúmenes de agua, ya que la capa helada superior aísla el agua de abajo y permite que permanezca líquida a temperaturas muy bajas. Sin embargo, esto también tiene una seria contrapartida negativa: el hielo superficial aumenta el albedo (el porcentaje de radiación incidente que refleja la superficie del planeta) y con ello disminuye la absorción de energía, lo que puede contribuir a un enfriamiento desbocado que conduzca a una glaciación.

La polaridad del agua propicia además el efecto *hidrofóbico*, por el que las sustancias apolares, o hidrofóbicas (con aversión al agua), tienden a agruparse entre sí en medio acuoso. Este efecto es clave para que las colas apolares de los fosfolípidos se agrupen y formen membranas, que son esenciales a su vez para la compar-

timentación celular, necesaria en el aislamiento de los organismos y la acción de la selección natural. También es fundamental para el plegamiento de las proteínas, en el que los aminoácidos hidrofóbicos se refugian en el interior y los *hidrofilicos* o «amantes» del agua quedan fuera, en contacto directo con ella.

Por supuesto, el disolvente —el agua en este caso— impone limitaciones sobre las biomoléculas y su química. Por eso, aunque nuestra vida se base en el carbono, no abundan las biomoléculas totalmente apolares como los hidrocarburos (con solo carbono e hidrógeno), y sí, en cambio, las que poseen grupos hidrófilos (como los hidroxilo, amino, carbonilo, carboxilo y fosfato).

El agua no es un disolvente inerte, pues está implicada directamente en muchas reacciones. Precisamente un posible inconveniente del agua es que favorece las reacciones de rotura, o *hidrólisis*, que aparecen como un gran obstáculo para la formación de ácidos nucleicos y proteínas en la Tierra prebiótica, y por tanto para entender el origen de la vida en nuestro planeta. Sin embargo, en la bioquímica actual las hidrólisis son esenciales para la destrucción controlada de las moléculas, con obtención de energía metabólica. Por ello hay enzimas que las catalizan (las *hidrolasas*), lo que hace evidente que no siempre son algo a evitar, sino que cumplen su papel en el conjunto de las redes bioquímicas.

Y esa no es la única muestra de la reactividad del agua. No es de extrañar que los químicos la eviten cuando quieren un disolvente inerte. Habitualmente, los químicos orgánicos, en particular, suelen preferir otros disolventes, como los hidrocarburos.

Si buscamos disolventes alternativos al agua (hidruro de oxígeno, H_2O), podemos empezar por los más parecidos a ella, que son otros hidruros no metálicos, como el cloruro o sulfuro de hidrógeno (HCl , H_2S). Y también el metano (CH_4) y el amoniaco (NH_3), relevantes por su abundancia en algunos ambientes.

¿Vida en otros disolventes?

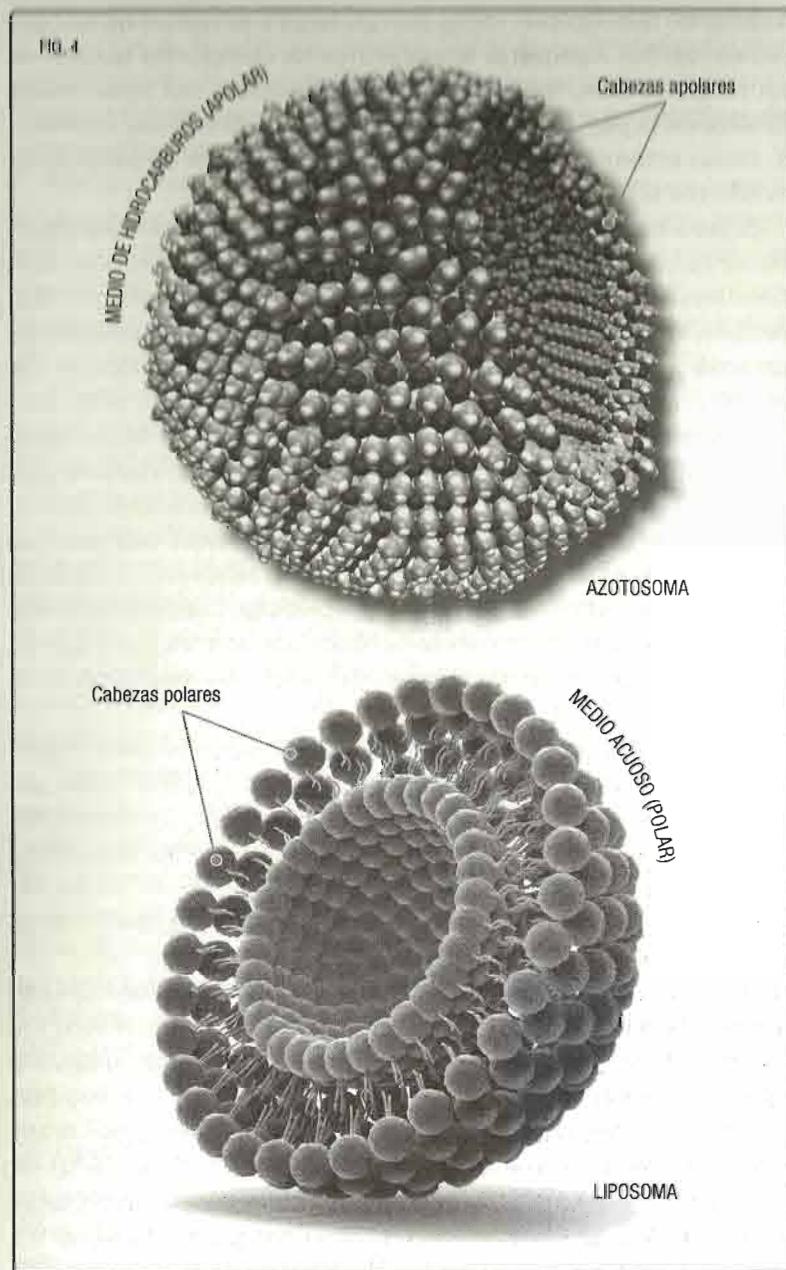
El agua (H_2O) y el amoniaco (NH_3) son moléculas parecidas porque el oxígeno (O) y el nitrógeno (N) lo son, y al unirse al

hidrógeno quedan con carga parcial negativa, menor en el caso del nitrógeno. Aunque el amoniaco es un compuesto líquido en un rango de temperaturas más estrecho que el del agua (véase la tabla de la pág. 52), el intervalo aumenta a presiones mayores. Y, como veremos, es una molécula relativamente abundante en el sistema solar.

Si para las propiedades del agua eran fundamentales los puentes de hidrógeno, también lo son para las del amoniaco, pero este tiene menor capacidad para formarlos, de ahí que hierva con más facilidad. El amoniaco también disuelve muchos compuestos orgánicos, y por ello es utilizado a menudo en los laboratorios. Disuelve mejor que el agua las moléculas hidrofóbicas, pero esto puede ser una dificultad a la hora de usar el efecto hidrofóbico para generar compartimentos. El amoniaco no soportaría la química de la vida terrestre. El bioquímico estadounidense Steven Benner sugiere que con ciertas adaptaciones, como convertir los enlaces $C=O$ en $C=N$, cabría imaginar un metabolismo en amoniaco, siempre que no haya oxígeno molecular, pues este lo oxida y destruye. Teniendo en cuenta su abundancia en ciertos lugares, podría ser un buen disolvente para la vida —con una bioquímica diferente— a bajas temperaturas.

Los hidrocarburos sencillos como el metano y el etano (CH_3-CH_3) tienen algunas ventajas frente al agua como disolventes para la química orgánica. Sobre todo, no destruyen compuestos mediante hidrólisis. Incluso en la vida que conocemos se saca partido de la reactividad orgánica en un medio apolar, pues muchas enzimas funcionan porque sus centros activos están en microambientes apolares.

Los hidrocarburos son abundantes en algunos lugares del sistema solar, especialmente en Titán, satélite de Saturno. Se especula que en un lago o mar de hidrocarburos apolares, los que tengan grupos polares podrían facilitar la formación de compartimentos, dando lugar al aislamiento necesario para que funcione la selección natural. Se ha propuesto un modelo teórico de membrana conocido como *azotosoma* en el que unas moléculas a base de nitrógeno («azoto»), carbono e hidrógeno generan vesículas similares a los liposomas. Estas vesículas se ensamblan



a partir de fosfolípidos con colas apolares y cabezas polares, las cuales quedan expuestas hacia el medio líquido. En los azotosomas es al revés, lo que asoma hacia el medio son las cabezas apolares de sus componentes (figura 4).

Como el ácido sulfúrico (H_2SO_4) es un disolvente razonablemente bueno, algunos autores han especulado con la posibilidad de que pueda sostener vida. Aunque tiene en su contra que es muy corrosivo y destructor en presencia de agua: su acción corrosiva consiste en que acelera reacciones de hidrólisis. En cambio, en ausencia de agua es un disolvente a tener en cuenta. Valoraremos esta posibilidad en el marco de la atmósfera de Venus.

La formamida ($HCONH_2$) se forma por la reacción de HCN con H_2O (ambos abundantes en el cosmos), y al ser también polar disuelve casi todo lo que se disuelve en agua. Pero es menos reactiva; en la formamida se forman muchas moléculas que son inestables en agua, como el ATP, los nucleósidos, los péptidos e incluso los ARN cortos. La propia formamida podría servir de principal precursor en la síntesis de los ARN. En suma, es un compuesto interesantísimo como disolvente y como precursor probiótico.

Por otro lado, el SiO_2 (sílice) en forma líquida también se postula como un posible candidato a disolvente para la vida, pero no se vislumbra cómo esta podría prosperar a temperaturas superiores a los 1700 °C. Nadie ha encontrado fósiles de los supuestos lavobios o magmobios en granitos o basaltos.

En definitiva, aunque no se descarten definitivamente otras posibilidades, el agua aparece como el disolvente más interesante para la vida en cualquier parte del universo. Y no olvidemos que es la molécula triatómica más abundante, tan ubicua que podemos decir que el universo es bastante «húmedo», aunque el reparto del agua sea muy desigual y el agua líquida no sea tan común (en el medio interestelar, por ejemplo, se encuentra principalmente en estado sólido o gaseoso). Por todo lo dicho, gran parte del esfuerzo astrobiológico en los últimos años (en particular el de la NASA) se ha basado en la consigna de «seguir el agua» (líquida). Pero esta, como sabemos, no basta.

VIVIR REQUIERE ENERGÍA

Para la vida tal como la conocemos, el disolvente líquido no es más que uno de los tres factores cruciales, que también incluyen un conjunto de elementos biogénicos (como C, H, N, O, P y S, o Si y otros) y una forma de energía utilizable. Para que haya energía disponible para la vida se requiere un desequilibrio termodinámico. En la búsqueda de ambientes habitables, por tanto, se deberían incluir los procesos que puedan mantener un desequilibrio químico suficiente.

En nuestro planeta, los seres vivos obtienen su energía en último término de dos fuentes: la luz solar y la energía química. La primera solo cabe en organismos de superficie. En las fumarolas negras, submarinas, la energía procede sobre todo de procesos de oxidación-reducción en ambientes ligados a fuertes desequilibrios térmicos en los que se promueven gradientes (diferencias de concentración) de protones y diversos compuestos.

Cabe la posibilidad de que otras formas de vida hagan buen uso de otras fuentes de energía. Por ejemplo, los gradientes de presión podrían servir en planetas como Venus y los gigantes gaseosos. O la energía cinética, allí donde hay grandes movimientos de convección, como, de nuevo, en los gigantes gaseosos. También la energía de las mareas es muy notable en varios satélites del sistema solar, sobre todo donde sirve para mantener «subocéanos» líquidos. Y se ha apuntado asimismo el posible uso de la (poco eficiente) energía térmica, los campos magnéticos y la radiactividad.

OTRAS BIOQUÍMICAS DEL CARBONO

Hemos especulado con la posibilidad de una vida basada en otros elementos distintos al carbono, pero no olvidemos las variaciones sobre su propia reactividad. Es decir, el caso de una vida basada en una química orgánica que no implique a los ácidos nucleicos, las proteínas, etc.

En los estudios sobre el origen de la vida, la hipótesis más extendida incluye, como sabemos, una etapa conocida como el «mundo del ARN», en el que este haría unos trabajos que ahora se reparten entre el ADN y las proteínas (aunque los ARN siguen siendo esenciales). Pero, dado que el paso del mundo del ARN al de ADN + ARN + proteínas no se vislumbra con facilidad, ¿es posible que en otras «historias» no se consiga, y que la vida se quede «estancada» en el mundo del ARN? La pregunta podría extenderse a los posibles precursores del ARN, los pre-ARN, en los que puede haber otras moléculas en lugar de la ribosa.

La cuestión es, al fin y al cabo, si los fundamentos de nuestra vida son los mejores, o más probables, en todas las condiciones. ¿Cabe esperar que en cualquier ambiente la vida se base en células, ADN (o ARN) como material genético, proteínas, membranas lipídicas, etc.?; ¿o hay otras posibilidades en la evolución químico-biológica?

Una respuesta adecuada nos llevaría a seguir paso a paso el camino hacia el origen de la vida, pero como está tan lleno de incertidumbres, nos detendremos solo en algunos aspectos.

Aminoácidos, sí. Pero ¿cuáles?

En los experimentos de simulación de la Tierra primitiva, bajo diferentes supuestos aparecen algunos compuestos claves en la vida que conocemos que también están presentes en los meteoritos. Entre ellos destacan siempre algunos aminoácidos. No es difícil especular, por tanto, con que otros seres vivos también hagan buen uso de ellos. Los aminoácidos son los constituyentes, mediante polimerización, de las proteínas, las grandes trabajadoras encargadas de catalizar las reacciones metabólicas mediante las que nos abastecemos de energía, mantenemos nuestras estructuras y propagamos la información genética. Parece probable que, de existir otras formas de vida, también las utilicen.

Pero también sirven los aminoácidos como fuentes de carbono y de nitrógeno para la formación de otros componen-

tes de los seres vivos, como azúcares y nucleótidos, y para el aprovechamiento de su energía mediante oxidación. Algunos, como la glicina, funcionan como neurotransmisores en el sistema nervioso central. Su versatilidad es tal que, unida a su fácil aparición prebiótica, hace difícil pensar que en otros sitios la vida no los haya aprovechado de alguna o varias de las maneras señaladas.

¿Qué aminoácidos? Como hay algunos que se forman con tanta facilidad en circunstancias tan diversas, son grandes candidatos a la universalidad. Nos referimos sobre todo a la glicina y la alanina, pero también a otros. Sin embargo, hay varios que casi seguro no estaban al principio, pues son de difícil formación. Su incorporación a las proteínas requirió el desarrollo de rutas bioquímicas para su biosíntesis. Es el caso del triptófano y la tirosina. En definitiva, no extrañaría encontrar en la vida extraterrestre una serie de aminoácidos comunes con los nuestros (los iniciales) y otros diferentes (los tardíos).

Para que haya vida similar a la conocida, se necesita que la información que dicta las secuencias de las proteínas esté almacenada en otro tipo de moléculas, pues las proteínas son incapaces de replicarse. Se requieren pues los ácidos nucleicos u otras macromoléculas con el mismo papel, y una suerte de código genético: ¿hasta qué punto similar al nuestro?

Otra cuestión es la de la secuencia, u orden, de los aminoácidos en las proteínas. Aun en el caso de que estos fueran exactamente los mismos en otras formas de vida, y de que se desarrollaran algunas actividades enzimáticas idénticas a las terrestres, ¿las secuencias serían parecidas? Supongamos una enzima de 100 aminoácidos. Considerando 20 tipos de estos, hay $20 \times 20 \times 20 \dots$ (cien veces), es decir, 20^{100} formas de construir una proteína de ese tamaño, un número inmensamente superior al de átomos en el universo. Entre esa enormidad de posibilidades ¿hay que encontrar una sola capaz de exhibir la actividad buscada? Por lo que sabemos de las secuencias terrestres, no. A menudo encontramos distintas soluciones para conseguir una misma actividad. Eso sí, observamos que, cuando se encuentra una de estas soluciones, se hereda (a veces con pequeñas modificaciones) y no se

«buscan» otras. Puede haber miles de maneras de conseguir una actividad determinada eficiente, y no es necesario encontrar «la mejor», basta con dar con una buena entre las muchas que hay, y eso no es tan difícil. Así que es probable que incluso las enzimas con exactamente las mismas capacidades que las terrestres no tengan una secuencia muy parecida, pues procederán de otra búsqueda azarosa en el espacio de secuencias.

Las primeras poblaciones de individuos

La evolución darwiniana debe actuar sobre variadas poblaciones de «individuos». Los primeros ya serían células delimitadas por membranas, y también el antepasado universal, LUCA. Ya sabemos que la formación de vesículas que aíslan parcialmente y protejan un espacio interior no es difícil: basta con una concentración suficiente de sustancias *anfipáticas* (en un medio acuoso, con colas apolares y cabezas polares). En nuestra vida, estas sustancias son los lípidos, pero en las células terrestres aparecen dos tipos, parecidos entre sí: uno en las arqueas y el otro en bacterias y eucariotas. Cualquiera de ellos serviría en otros lares, pero también podrían valer otras moléculas anfipáticas.

¿Eucariotas, pluricelulares...?

La sencilla estructura procariótica de bacterias y arqueas parece casi inevitable en la aparición de cualquier tipo de vida. Pero ¿debe la evolución de los procariotas conducir inevitablemente a algo como los eucariotas (con núcleo, membranas intracelulares y orgánulos como las mitocondrias)? Esto es mucho más dudoso. En la Tierra, el «paso» se demoró quizá más de 1 700 Ma, por lo que no parece que fuera sencillo. Una vez aparecidos los eucariotas, hicieron falta otros 1 000 Ma para la conquista de la pluricelularidad, lo que por un lado hace pensar que tampoco fue trivial, pero por otro nos consta que se consiguió de manera independiente repetidas veces.

OTROS CÓDIGOS, OTRA QUIRALIDAD

En el código genético actual hay 20 aminoácidos (o 22, si se incluyen dos que entran de manera peculiar), pero hay «sitios» para unos 40 más. Se ha conseguido expandir artificialmente el código introduciendo aminoácidos extra, y no hay razones contundentes para afirmar que no puedan estar codificados en otras formas de vida. De hecho, nuestras proteínas hacen uso de muchos más que 20 aminoácidos, gracias a que pueden modificarse una vez en ellas. El código «universal» terrestre probablemente no los incluyó debido a que se «congeló» cuando ya propiciaba proteínas muy eficaces, lo que impidió ulteriores cambios. Aunque en otros lugares se produzca una «congelación» similar, no tiene por qué ocurrir en el mismo «punto», de modo que el número de aminoácidos codificados no tiene por qué ser 20 (o 22). De manera que aunque otros códigos sean también de tripletes (lo que es discutible, pero probable), los aminoácidos especificados no solo podrían ser en parte diferentes, sino distinto su número.

Segunda letra				Tercera letra	
U	C	A	G		
UUU Phe	UCU Ser	UAU Tyr	UGU Cys	U	
UUC Phe	UCC Ser	UAC Tyr	UGC Cys		
UUA Leu	UCA Ser	UAA FIN	UGA FIN		
UUG Leu	UCG Ser	UAG FIN	UGG Trp		
C	CUU Leu	CCU Pro	CAU His	CGU Arg	U
	CUC Leu	CCC Pro	CAC His	CGC Arg	C
	CUA Leu	CCA Pro	CAA Gln	CGA Arg	A
	CUG Leu	CCG Pro	CAG Gln	CGG Arg	G
A	AUU Ile	ACU Thr	AAU Asn	AGU Ser	U
	AUC Ile	ACC Thr	AAC Asn	AGC Ser	C
	AUA Ile	ACA Thr	AAA Lys	AGA Arg	A
	AUG Met	ACG Thr	AAG Lys	AGG Arg	G
G	GUU Val	GCU Ala	GAU Asp	GGU Gly	U
	GUC Val	GCC Ala	GAC Asp	GGC Gly	G
	GUA Val	GCA Ala	GAA Glu	GGA Gly	A
	GUG Val	GCG Ala	GAG Glu	GGG Gly	G

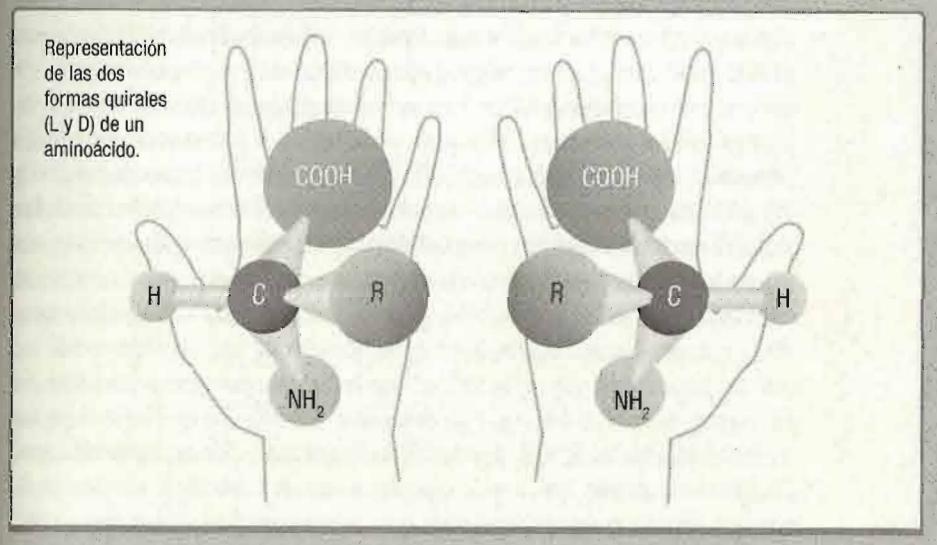
El código genético.

¿Correspondencias al azar?

Otro aspecto es el de las características detalladas del código genético. Aún no está claro hasta qué punto las asignaciones derivan del azar o de interacciones específicas entre aminoácidos y nucleótidos, por lo que es difícil especular. Pero ciertas regularidades (como el que la primera base de los codones esté relacionada con el origen biosintético, y la segunda con las propiedades fisicoquímicas) parece más probable que se presenten de manera general.

Aminoácidos zurdos

Un aspecto particularmente intrigante es el de la *quiralidad* de los aminoácidos. Los nuestros son quirales (de *kiros*, mano), es decir, lo mismo que pasa con nuestras manos izquierda y derecha, hay imágenes especulares no superponibles de las formas L y D de los aminoácidos, como muestra la figura. En las proteínas de los organismos terrestres, todos los aminoácidos son «zurdos» (formas L). Pero si fueran todos «diestros» (D) funcionarían igual de bien. Podríamos pensar, en principio, que la probabilidad de que en la vida extraterrestre se usen los «diestros» en las eventuales proteínas es del 50 %. Sin embargo, se ha descubierto que los «zurdos» son ligerísimamente más estables, y que hay un cierto exceso de ellos en algún meteorito, por lo que cabe pensar que están favorecidos. Si hay un fundamento fisicoquímico universal a favor de los aminoácidos «zurdos», será mayor la probabilidad de que también lo sean los que se empleen en la eventual vida extraterrestre. Sobre argumentos similares, podríamos esperar que el predominio de azúcares «diestros» (D) en nuestros ácidos nucleicos sea un rasgo generalizado... siempre y cuando haya ácidos nucleicos.



CONVERGENCIAS EVOLUTIVAS UNIVERSALES

Parece que en la Tierra se exploraron multitud de posibilidades de morfologías pluricelulares, como las que se ven en el yacimiento fósil de Ediacara, en Australia (de unos 600 Ma) y las que resultaron de la llamada «explosión Cámbrica» (570 Ma), y solo algunas pervivieron. Todo indica que hay patrones morfológicos que son casi inevitables, porque son muy ventajosos y accesibles. Unas simetrías se generan mejor que otras, y ofrecen más ventajas. Las afinidades y restricciones fisicoquímicas ya generan lo que podríamos llamar «convergencias moleculares». Cuando se aporta energía a una mezcla de gases, unas reacciones son mucho más probables que otras debido a factores cinéticos y termodinámicos que deben ser universales. De ahí que la pronta aparición de compuestos como el formaldehído (formol), el cianuro, y algunos aminoácidos, sea la norma: la facilidad de su formación (cinética) y su estabilidad (termodinámica) casi lo aseguran. Que los compuestos anfipáticos se autoorganicen dando lugar a vesículas no es un azar, y cabe esperarlo en cualquier sitio del universo. Como también es de esperar que predominen unas simetrías sobre otras debido a su más fácil formación y mayor estabilidad. Un siglo atrás, ya el biólogo y matemático escocés D'Arcy Thompson (1860-1948) hizo perspicaces reflexiones sobre el papel de la física en la determinación de las formas y estructuras de los seres vivos.

Apelando a los mecanismos evolutivos, el paleontólogo inglés Simon Conway Morris (n. 1951) defiende —sobre todo en su libro de 2015 *Las runas de la evolución*— que en otros planetas debe haber una vida vegetal y animal similar a la terrestre. Recurre para ello a la convergencia evolutiva por la cual, por ejemplo, los ojos de los pulpos y de los vertebrados son muy parecidos, aunque aparecieron de manera independiente. También, para moverse en un medio acuático, se han reinventado infinidad de veces las aletas y la forma de pez, tanto que podríamos considerar que son formas «universales», al igual que las alas para desplazarse por el aire. Del mismo modo, para situarse en el medio aéreo (murciélagos, aves) y en el acuático (cetáceos) se ha reinventado la ecolocación. Conway pone cientos de ejemplos de convergencias evolutivas.

En definitiva, sean cuales sean las bioquímicas extraterrestres (si es que las hay) no nos extrañaría encontrarnos con formas y hábitos hasta cierto punto «familiares», pues la evolución redescubre los mismos patrones una y otra vez. Por eso Conway espera que, de existir vida extraterrestre, exhiba las mismas estructuras corporales de las especies conocidas, compartiendo con ellas tipos de extremidades, cuerpos segmentados, tubo digestivo, cabeza con órganos sensoriales, etc. Aunque habría que considerar, entre otros, efectos como los de la gravedad (su aumento promueve menores tamaños celulares y corporales, mayor grosor de las patas...) o el tipo de estrella (los colores de las plantas dependerán de las longitudes de onda predominantes). El astrobiólogo estadounidense Dirk Schulze-Makuch (n. 1964) opina que en un medio no acuoso, sino de hidrocarburos como el de Titán, las bacterias podrían ser mucho más grandes por la menor tensión superficial de los disolventes respecto a la del agua. Hay que añadir que se espera que sea muy común el empleo de los mecanismos evolutivos basados en la modularidad y en la duplicación y divergencia, así como que la selección natural promueva la competencia y la cooperación.

Para Conway, la inteligencia sería otra característica común, por lo que estaría «casi garantizada», así como «debilidades» asociadas: la codicia, la violencia... La inteligencia tecnológica se daría solo en especies de tierra, las únicas que podrían usar el fuego y construir artefactos. El autor espera que existan extraterrestres parecidos a los humanos en al menos algunos de esos planetas.

Sin embargo, es un asunto controvertido. La mayor parte de la vida será seguramente más simple sobre todo por limitaciones energéticas; Schulze-Makuch calcula, por ejemplo, que en la luna Europa, sobre la base de sus fumarolas submarinas, no podría haber organismos más complejos que los camarones. En la Tierra parece que fue necesario que unas bacterias dieran lugar a las mitocondrias (al ser engullidas por unas arqueas complejas),

Mi opinión es que la evolución darwiniana es bastante predecible. Cuando se tienen una biosfera y la evolución se hace cargo, emergen temas comunes, y lo mismo es cierto para la inteligencia.

SIMON CONWAY MORRIS

propiciando un manejo de mucha más energía metabólica, para que fuera posible la complejidad de los eucariotas, sobre todo pluricelulares.

LA TIERRA RARA

Por otra parte, hay autores que afirman que las investigaciones sobre el origen de la vida no respaldan la esperanza de encontrarla más allá de la Tierra, que por tanto responde más a un deseo que a una predicción racional. Esta visión se ha concretado en lo que se conoce como «hipótesis de la Tierra rara» (o «especial»), que afirma que los requisitos para la aparición de la vida (sobre todo la compleja) van muchísimo más allá de contar con un planeta de tipo Tierra ubicado a la distancia adecuada de una estrella de tipo solar.

Quienes han defendido esta propuesta con más éxito han sido el paleontólogo Peter Ward (n. 1949) y el astrobiólogo Donald E. Brownlee (n. 1943), ambos de la Universidad de Washington, a partir de su libro de 2000 *Por qué la vida compleja es rara en el universo*. Para ellos, cada contingencia o particularidad de la Tierra y de su entorno es esencial, desde la existencia de la Luna y Júpiter hasta nuestra posición concreta en la galaxia, y es muy improbable que se repita en otro lugar.

¿Qué peso tienen las fuerzas convergentes y contingentes en la eventual evolución de la vida en el universo? Podemos apreciar que, dentro de las convergencias dictadas por las restricciones antes señaladas, queda un margen para el azar. Resta por saber hasta dónde alcanza la tendencia a la convergencia y la fuerza de la contingencia.

Ward y Brownlee, por un lado, y Conway, por otro, coinciden después de todo en proponer que somos únicos en algún sentido: el último, porque toda la vida que pueda haber en el universo sería como la nuestra; los dos primeros, porque no habría más vida compleja que la nuestra. Entre uno y otros se abre la posibilidad de una «diversidad» de formas de vida, sencillas y complejas.

El universo como escenario biológico

Para considerar las posibilidades de vida en el universo, necesitamos conocerlo partiendo de su propio origen y evolución hasta el momento presente. Entonces podremos calibrar dónde es más probable que haya aparecido o pueda aún surgir algún tipo de vida, lo que llamamos las «zonas habitables». Pero estas pueden ser más o menos longevas.

El universo está en expansión. La distancia media entre las galaxias no deja de aumentar. Eso significa que en el pasado estuvieron más próximas, y que hubo un momento en el que la expansión comenzó; fue en el llamado *Big Bang* («Gran Explosión»), que se estima ocurrió hace unos 13 800 Ma.

Afortunadamente para la vida, la expansión no es incompatible con las agregaciones locales de materia debidas a la fuerza de la gravedad. Esta ha dado lugar a las galaxias y sus agrupaciones, que no se expanden internamente. La mayor parte de las galaxias se formaron probablemente menos de 2000 Ma después de la Gran Explosión. Así ocurrió con la nuestra, la Vía Láctea.

En las galaxias, por la misma gravedad colapsan las nubes de gas y polvo. Las estrellas nacen cuando se alcanza una densidad de material suficiente para iniciar los procesos de fusión nuclear, en los que cada cuatro núcleos de hidrógeno (H, con 1,0079 unidades de masa atómica) se funden, generando, en varias etapas, otro más pesado, de helio (He, 4,0026 u.m.a.). En estas reacciones se pierde algo de masa, que se transforma en energía según la conocida ecuación $E=mc^2$ (en la que E es la energía, m la masa y c la velocidad de la luz). A su vez, tres núcleos de helio

pueden fundirse generando uno de carbono (C, 12,0108 u.m.a.). En estrellas como el Sol, la fusión no va más allá y no se generan elementos más pesados que el carbono, pero las más masivas siguen adelante formando otros tan importantes para la vida como el oxígeno, el fósforo, el azufre y el hierro.

Los planetas nacen al mismo tiempo que las estrellas, cuando parte del material de la nube inicial experimenta una acreción en torno a la estrella central. Giran aproximadamente en el mismo plano, en una estructura que acostumbra tener forma de disco. Según su composición y tamaño, se distingue entre planetas rocosos (o telúricos) y gaseosos. Los primeros, con mayor proporción de elementos pesados, son más pequeños y densos. De los segundos (que a pesar de su nombre pueden tener un núcleo rocoso) nos interesarán sus a veces grandes satélites.

Una estrella «vive» mientras tiene material para la fusión, y la velocidad a la que lo consume depende de su masa: cuanto mayor es esta, mayor es también la densidad y la temperatura de su núcleo, y más rápido el consumo de combustible. La vida del Sol estará en torno a los 10000 Ma, pero las estrellas de menos masa pueden durar cientos de miles de Ma. Las muy masivas, en cambio, acaban en pocos Ma con enormes explosiones llamadas *supernovas*, en las que esparcen el material estelar por un amplio entorno. Así pueden contribuir a nuevas nubes de gas y polvo con el que se forman otros sistemas planetarios. De particular interés es la liberación de carbono y los elementos pesados señalados antes, pues son esenciales para la vida que conocemos. De ahí que Carl Sagan y otros dijeran que somos «polvo de estrellas», aunque el hidrógeno no haya sufrido procesamiento estelar.

Los sistemas planetarios no «contaminados» con restos de supernovas están constituidos casi exclusivamente por hidrógeno y helio, y solo por un 0,1% de elementos pesados. Nuestro sistema solar tiene, en cambio, gracias a que probablemente es de tercera generación, en torno a un 2% de elementos pesados. Aunque pueda parecer poco, basta un 0,5% para que se formen planetas rocosos como la Tierra.

De todos estos datos concluimos que la vida, al menos del tipo que conocemos, no fue posible en los primeros sistemas plane-

tarios, carentes de carbono y otros elementos pesados. Hubo que esperar a la formación de los de segunda generación u otras posteriores, que pudieron estar presentes a partir de aproximadamente 2000 Ma tras el Big Bang. Desde entonces han pasado unos 12000 Ma más, tiempo suficiente para ciclos completos de vida de estrellas como el Sol. Si aceptamos que la vida en la Tierra apareció en torno a los 800 Ma de su formación, un sistema planetario como el nuestro pero de nacimiento temprano habría generado vida cuando el universo apenas tenía 3000 Ma, hace unos 11000 Ma, y vida como la humana hace nada menos que 7500 Ma. Ese «sol» habría acabado su ciclo sostenedor de vida hace unos 2000 Ma, pero podría haber otros «soles» más tardíos en pleno ciclo vital y, según se ha calculado recientemente, la gran mayoría de estrellas y planetas están aún por nacer. Si queremos evaluar las posibilidades de vida en el universo fuera de la Tierra, debemos conocer cuántos lugares pueden albergarla.

Cuanto más lejos vayamos, más probabilidades hay de encontrar vida no relacionada con nosotros.

CHRIS MCKAY

CUNAS DE LA VIDA EN EL UNIVERSO

No sabemos cuántas estrellas hay en el universo. Nos tenemos que conformar con lo que podemos «ver», que es lo que se llama el *universo observable*. Este abarca los objetos que están hasta una distancia de unos 14000 Ma. Si, como cabe esperar, hay algo —o mucho— más lejos, su luz no nos llega.

Nosotros estamos en el centro de ese universo observable, pero eso no significa que seamos el centro del universo. Cualquier eventual observador, por alejado que esté de nosotros, sería el centro de su universo observable.

En el universo que se encuentra a nuestro alcance se calcula que hay al menos unos 100 000 millones (100 000 000 000, o 10^{11}) de galaxias, pero algunas estimaciones elevan ese número a unos 200 000 y hasta 500 000 millones. Considerando que cada galaxia tiene en promedio unos 100 000 millones de estrellas,

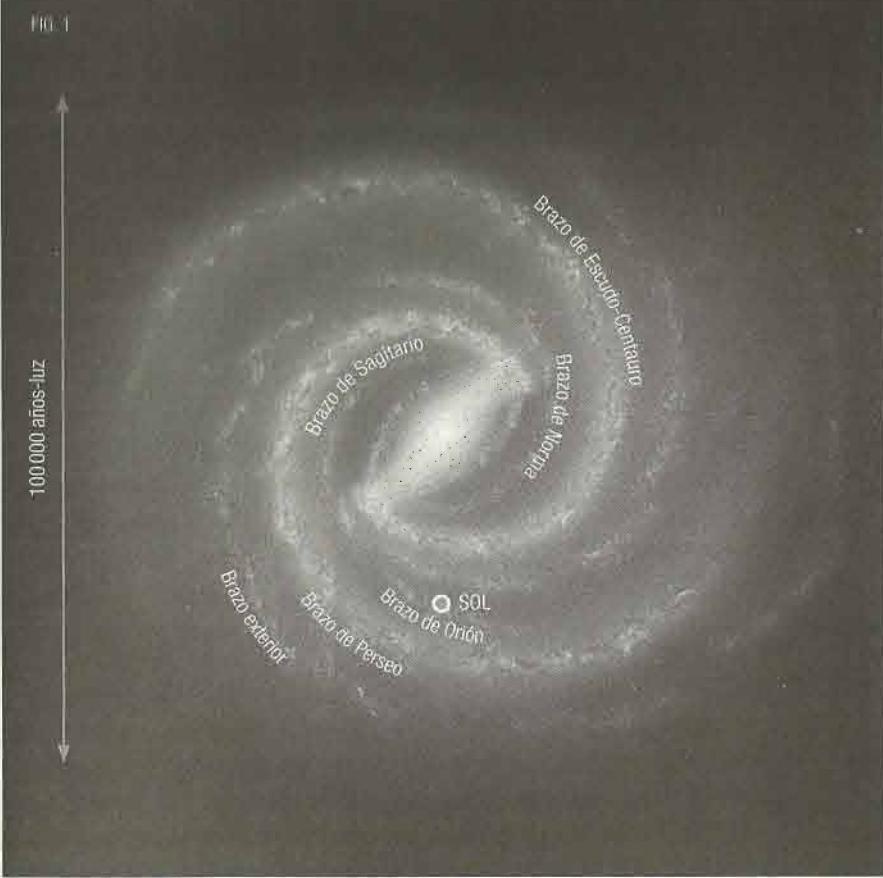
el universo observable tendrá al menos unos 10 000 trillones ($10^{11} \cdot 10^{10} = 10^{21}$).

Entre esa inmensidad, ¿dónde está nuestro planeta? La Tierra forma parte de un sistema planetario en cuyo centro está el Sol. Este está orbitado, además de por la Tierra, por otros planetas, satélites y diversos cuerpos de tamaño menor, como asteroides y cometas. El Sol y todas las estrellas que vemos por la noche forman parte de nuestra galaxia, la Vía Láctea. Esta tiene del orden de 200 000 millones de estrellas, y se estima que al menos hay otros tantos planetas. Si pudiéramos contar 10 estrellas por segundo sin descanso, tardaríamos más de 600 años en contarlas todas.

La Vía Láctea tiene forma de disco, con varios brazos espirales (figura 1). El disco mide unos 100 000 años-luz de diámetro, y el sistema solar gira a unos 28 000 años-luz del centro, entre el brazo de Orión y el de Sagitario, una vez cada 230 millones de años. La estrella más próxima al Sol es Próxima Centauri, que está a unos 4,2 años-luz. La sonda Voyager 1, que se lanzó en 1977 y se aleja a unos 17,4 km/s, tardaría unos 75 000 años en llegar a Próxima Centauri (si viajase hacia ella, que no es el caso). Pensemos ahora que si toda la galaxia entrara en un campo de fútbol, tendríamos a Próxima Centauri a solo 4,2 mm.

Nuestra galaxia, junto a otra treintena, forma un *grupo local*. La Vía Láctea es una de las tres grandes de ese grupo (por detrás de Andrómeda y por delante de Triángulo). Nuestro grupo local se acerca a otras docenas de grupos locales que constituyen un *cumulo galáctico*, el de Virgo. Los cúmulos, a su vez, forman *supercúmulos*. El nuestro también se llama de Virgo, y contiene unos cien grupos y cúmulos de galaxias. Se sospecha que los supercúmulos forman a su vez *hipercúmulos* o *filamentos galácticos* (véase la imagen de las págs. 74-75).

No olvidemos, por cierto, que la materia y energía visibles (de las que estamos hablando) representan una parte menor de lo que existe en el universo; en nuestra propia galaxia, la mayor parte de la masa no se encuentra en el disco visible, sino en un halo esférico y «oscuro» que lo rodea, de naturaleza desconocida. Como dice el físico británico Richard Massey (n. 1977), «la vida no sería posible sin materia oscura; es como el pegamento

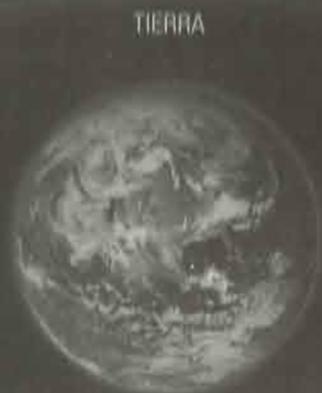


La posición del sistema solar en la Vía Láctea.

que hace las galaxias habitables» (refiriéndose a sus grandes efectos gravitacionales). Al margen de esto, poco hay que añadir; las especulaciones sobre una «vida oscura» basada en esas enigmáticas materia y energía son hoy ciencia ficción.

¿Dónde esperamos que pueda haber surgido o que aparezca la vida? Ya que conocemos la estructura del universo visible como, en buena medida, suma de galaxias, empezaremos por preguntar:

NUESTRO PLANETA, UNO ENTRE BILLONES EN EL UNIVERSO



TIERRA

SISTEMA SOLAR



Aunque por ahora somos el único planeta con vida que conocemos en el cosmos, el que haya otros mundos habitados es, como mínimo, plausible: hay billones de «tierras» «allá fuera». La imagen muestra ocho mapas celestes que transitan desde

un primer plano de la Tierra, pasando por nuestra posición dentro del sistema solar y en la Vía Láctea, hasta alejarse por los vecindarios interestelares, rozando los límites de lo que se considera el universo observable.



GRUPO GALÁCTICO LOCAL

SUPERCÚMULO DE VIRGO

VECINDARIO INTERESTELAR



VÍA LÁCTEA



VECINDARIO INTERESTELAR



SUPERCÚMULOS LOCALES

SUPERCÚMULOS LOCALES

HIPERCÚMULOS O FILAMENTOS GALÁCTICOS

tarnos si todas son igualmente idóneas, y luego examinaremos si dentro de cada una hay regiones más adecuadas, hasta concretar las mejores localizaciones.

Galaxias de todo tipo

La clasificación de las galaxias más común se debe al astrónomo estadounidense Edwin Hubble (1889-1953), que en 1925 distinguió, según su forma, entre en elípticas, espirales e irregulares.

Las galaxias elípticas son aproximadamente elipsoides (una elipse en tres dimensiones), y suelen ser las más grandes y masivas (en promedio, el doble de masa que la Vía Láctea). Las hay desde casi esféricas a muy alargadas. Tienen mayor densidad estelar en el centro, y sus estrellas son generalmente muy viejas, de hasta más de 12000 Ma y de color anaranjado o rojizo.

Las galaxias espirales, como la Vía Láctea, tienen un denso bulbo central más viejo y elíptico (como una pequeña galaxia elíptica) del que parten brazos espirales. Alrededor, con una forma casi esférica, está el halo con materia oscura. En los brazos abunda la materia interestelar y las nubes de polvo y gas que pueden dar lugar a la formación de nuevas estrellas. Predominan ahí las azuladas y jóvenes, de hasta menos de 10 Ma. Suelen encontrarse dispersas, más que en cúmulos. En conjunto, las galaxias espirales poseen estrellas de todas las edades y masas.

Por su parte, las galaxias irregulares no tienen una estructura definida. Cuentan con una abundante formación estelar y predominan las estrellas jóvenes. Además, hay galaxias de tipo intermedio entre las anteriores. ¿Son unas más propicias para la vida que otras? Para responder debemos «adentrarnos» un poco en ellas.

Confortabilidad galáctica

Para que se desarrolle la vida como la conocemos, es preciso que el cuerpo que la alberge esté en una región «confortable» del es-

pacio, en alguna de las «zonas de habitabilidad» o simplemente zonas habitables.

En una zona habitable se dan unas condiciones que se estiman adecuadas, o propicias, para que prospere una vida similar a la terrestre, pero por supuesto eso no garantiza nada: no debe confundirse nunca «habitável» (si se prefiere, «potencialmente» habitable) con «habitada», ni la capacidad para albergar vida con la de generarla. En general solo se contempla la existencia de agua líquida sobre la superficie de un planeta rocoso durante un tiempo prolongado (de al menos unos cientos de millones de años).

Pero hay que tener en cuenta las posibles «agresiones» del entorno galáctico. En el centro de muchas galaxias, incluida la nuestra, parece haber un agujero negro, y las radiaciones gamma y X que libera, junto a las emitidas por las estrellas de neutrones próximas, pueden ser nefastas para la vida.

Además, cerca del centro galáctico son frecuentes las supernovas, que pueden menoscabar gravemente la habitabilidad de los planetas hasta a decenas de años-luz. El flash inicial de una supernova puede destruir la capa de ozono de un planeta próximo, exponiendo la vida a radiación UV y rayos cósmicos... y más tarde llega el grueso de las eyecciones de la supernova. También pueden perjudicar sus efectos gravitacionales, que perturbarían las órbitas planetarias, y a veces favorecerían impactos de grandes cuerpos que podrían acabar con la vida existente. Las temibles supernovas son frecuentes, además de en los núcleos galácticos, en otras regiones densas, como las zonas de los brazos espirales con una alta tasa de formación estelar. Según algunos autores, el paso del Sol por una de estas zonas pudo ser la causa de algunas extinciones masivas, pero ahora está fuera de ellas y, al ir a la velocidad de los brazos, no se acerca a ninguna región peligrosa.

Mucho menos frecuentes que las supernovas normales son las de tipo gigantesco, o *hipernovas*, que parecen las princi-

Teniendo en cuenta que las [galaxias] elípticas son mucho más hospitalarias para planetas habitables, se plantea la interesante pregunta de si la vida aquí en la Vía Láctea es solo una extravagancia de la naturaleza.

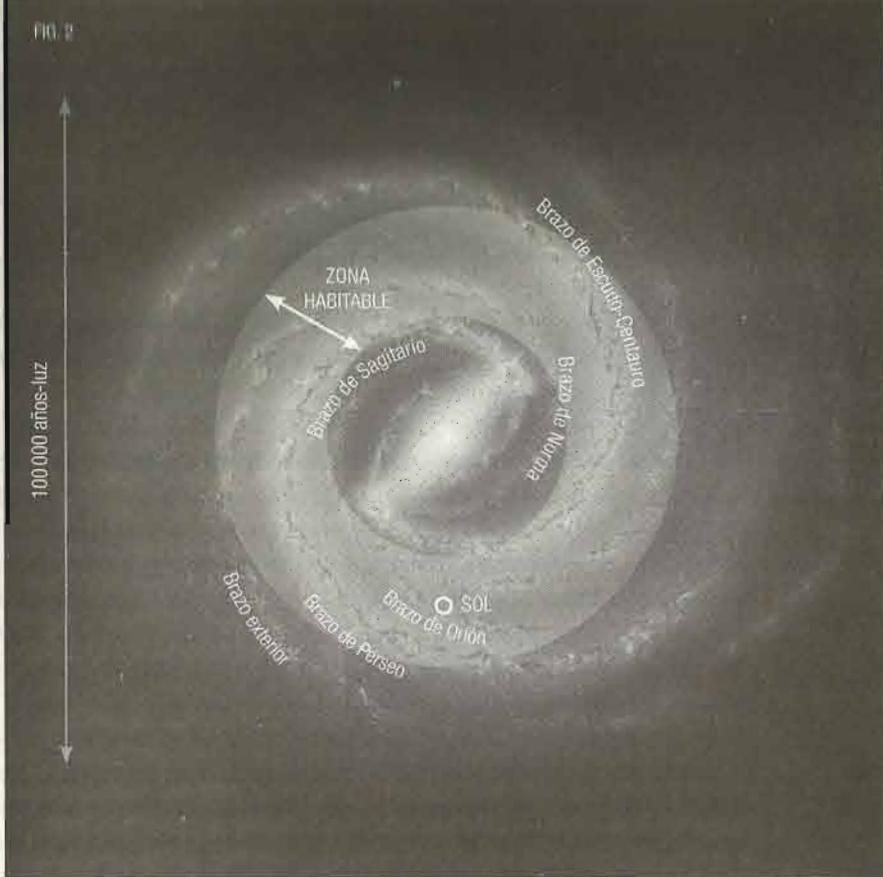
PRATIKA DAYAL

pales responsables de las colosales explosiones de rayos gamma (*GRB*, de las siglas en inglés) que pueden asolar la eventual vida a distancias mucho mayores que una supernova común. Afortunadamente, su frecuencia disminuye conforme envejece el universo.

En general, conforme nos alejamos del centro galáctico desciende el riesgo para la vida, pero también disminuye la proporción de elementos pesados, lo que los astrofísicos denominan equivocadamente *metallicidad* (como si todo lo que no sea hidrógeno y helio fueran metales). A mayor metalicidad, mayor frecuencia de planetas. Pero una metalicidad muy alta puede ser perjudicial para la vida, pues tal vez promueva en exceso la formación de gigantes gaseosos con cierta capacidad de atraer y destruir a los planetas rocosos habitables.

En suma y a grandes rasgos, al apartarnos del centro galáctico primero aumenta la capacidad de soportar vida y luego desciende. Como resultado, la zona habitable galáctica es aproximadamente una corona esférica o gruesa cáscara intermedia (galaxias elípticas), o bien un anillo (galaxias espirales, figura 2). Se ha estimado que en la Vía Láctea esta zona ocupa entre los 15 000 y los 38 000 años-luz desde el centro. Por debajo de 15 000, el agujero negro y las supernovas impedirían la vida —sobre todo la compleja—, y más allá de 38 000, la baja metalicidad limitaría la formación de planetas terrestres. Ese anillo incluye en torno al 20% del total de estrellas de la galaxia. Naturalmente, la zona habitable galáctica va cambiando con el tiempo. Por ejemplo, la Vía Láctea se ha ido haciendo en promedio más bioamigable al disminuir el número de supernovas y la actividad del núcleo galáctico, y al aumentar la metalicidad.

A la luz de lo dicho, ¿hay diferencias en la habitabilidad de los distintos tipos de galaxias? El proyecto de investigación *Exploración Digital del Espacio*, de la Fundación Sloan, ha analizado en 2015 más de 150 000 galaxias «próximas» y ha realizado el primer «modelo cosmobiológico» sobre la habitabilidad del universo. La astrofísica india Pratika Dayal (n. 1984) y sus colegas han mostrado que las galaxias que tienen más elementos pesados son, por lo general, las más grandes, que suelen ser elípticas.



Zona de habitabilidad de la Vía Láctea.

Como además son más pobres en supernovas, estiman que pueden albergar unas 10 000 veces más planetas habitables que las espirales como la Vía Láctea. Si es así, somos afortunados (o, si se quiere, no seríamos tan «mediocres» o «copernicanos»), pues no estamos en una galaxia óptima para la vida.

Pero no todas las galaxias son iguales en cuanto a tranquilidad. Hay muchas que sufren colisiones con otras, lo que aumenta la

generación de supernovas y otras perturbaciones. La Vía Láctea parece haber sido sosegada en este sentido, aunque puede que colisione con Andrómeda en unos 6 000 Ma.

Para concluir podemos afirmar que habitamos en lo que parece ser una buena región del universo, aunque ni extraordinariamente singular ni especialmente privilegiada.

ZONAS HABITABLES DE LAS ESTRELLAS

La zona de habitabilidad o zona habitable (ZH) de una estrella es la región de su alrededor en la que las condiciones permiten la existencia de agua líquida permanente y abundante sobre la superficie de un planeta similar a la Tierra.

Se la suele considerar un anillo más o menos amplio. En la región interior al anillo se produciría una aceleración del efecto invernadero, que origina un calentamiento excesivo (como ocurre en Venus), y en la exterior una desaparición del agua líquida por congelación (como en Marte) (figura 3). Por eso se la denomina a veces zona «ricitos de oro», según el cuento popular en el que una niña, ante las sopas de tres osos, se toma la que no está ni demasiado fría ni demasiado caliente. Es decir, la que está a la temperatura adecuada.

Los valores más aceptados hoy como límites de la ZH, para «tierras» con atmósferas $N_2-CO_2-H_2O$, los argumentaron el geólogo estadounidense James Kasting (n. 1953) y colaboradores en 2013: para el sistema solar, entre 0,99 y 1,7 unidades astronómicas (UA: distancia media entre la Tierra y el Sol, unos 150 millones de km). Para el límite interno consideraron la pérdida de agua debida a un efecto invernadero desbocado y, para el exterior, la condensación del CO_2 . Como vemos, la Tierra, a 1 UA del Sol, está dentro de esa ZH por los pelos, en el borde del sobrecalentamiento. Venus, a 0,72 UA del Sol, ahora queda fuera, pero Marte, a 1,52 UA, dentro (esté o no habitado). Puede que no sea rara la presencia de más de un planeta habitable en torno a una estrella (tenemos otros ejemplos) y, si sus órbitas se aproximan, se elevan las posibilidades de panspermia.

FIG. 3



Zona habitable estelar de un sistema planetario con una estrella similar a nuestro Sol.

De las zonas habitables nos interesa, además de su extensión, su duración y estabilidad, y todo ello depende en gran medida de la naturaleza de la estrella.

Tipos estelares y habitabilidad

Hay una gran diversidad de tipos estelares, y unos parecen mucho más idóneos que otros para originar y sostener durante largo tiempo alguna forma de vida.

Lo primero que percibimos de las estrellas es su brillo, que depende de su luminosidad real y de la distancia. Por ejemplo, Sirio no es una estrella muy luminosa, pero está relativamente cerca (a unos 8,6 años-luz) y es la más brillante del cielo nocturno. La luminosidad tiene que ver con la temperatura superficial de la estrella, que a su vez guarda relación con la masa y se refleja en el espectro de la estrella (una especie de «código de barras» que nos dice cómo absorbe las distintas frecuencias de la radiación), que determina su color (véase la tabla de la página siguiente).

Clase	%	Temperatura (K)	Color convencional	Masa	Radio	Luminosidad	Vida media (Ma)	Ejemplo
O	0,001	28000-50000	Azul	60	15	>140000	1	48 Orionis
B	0,1	9600-28000	Blanco azulado	18	7	20000	100	Rigel
A	1	7100-9600	Blanco	3,1	2,1	80	1000	Sirio A
F	2	5700-7100	Blanco amarillento	1,7	1,3	6	4000	Canopus
G	7	4600-5700	Amarillo	1,1	1,1	1,2	15000	Sol
K	15	3200-4600	Amarillo anaranjado	0,8	0,9	0,4	30000	Arturo
M	75	1700-3200	Rojo	0,3	0,4	0,04	200000	Antares

Clasificación estelar según el tipo espectral. Las magnitudes *masa*, *radio* y *luminosidad* se establecen con respecto al Sol (Sol = 1). En todos los casos se ofrecen valores típicos.

Por todo ello se ha impuesto la llamada clasificación espectral de Harvard, que se estableció en esta universidad entre finales del siglo xix y principios del xx. En ella, los principales tipos de estrellas se denominan, yendo de las más masivas y calientes a las menos con las siguientes letras mayúsculas: OBAFGKM (derivadas de un orden alfabético previo basado en ciertas características espectrales). Hay una regla mnemotécnica en inglés, de dudosa corrección, para recordarlas: *Oh, Be A Fine Girl/Guy Kiss Me* («Oh, sé una buena chica/un buen chico, bésame ahora mismo dulcemente»).

Cada tipo espectral se divide en subtipos del 0 al 9. Por ejemplo, las G0 (o «G tempranas») se parecen a las F9 (o «F tardías») y las G9 a las K0. El Sol es una G2.

Los distintos tipos estelares difieren mucho en su capacidad para mantener vida. Las estrellas de mayor tamaño (O, B, A y F tempranas) son demasiado energéticas y poco longevas. Veamos el resto.

Las estrellas F tardías (de F4 en adelante), G y K parecen las más adecuadas para acunar vida debido a su estabilidad, amplitud de la zona habitable y duración. Las G, que suponen el 7% del total, son las que requieren menos explicaciones, pues el Sol es una de ellas. Así que podríamos considerarlas, en principio, las más favorables para la vida; sin embargo, más o menos la mitad de ellas surgieron antes de que la proporción de elementos de alto peso atómico en las nubes de gas y polvo fuera suficiente para formar planetas de tamaño terrestre con compuestos de interés probiótico. Por otro lado, más de la cuarta parte son más jóvenes que el Sol, por lo que en sus planetas ha habido menos tiempo para desarrollar una evolución como la nuestra.

Según nos «movemos» de las F a las K, disminuye la radiación ultravioleta estelar y, por tanto, la necesidad de protección atmosférica para una vida expuesta, superficial. Esta es una de las razones por las que muchos consideran a las estrellas de tipo K (enanas naranjas, que suponen ya el 15% del total) las más agradadoras para la vida. En ellas se hallarían los llamados planetas «superhabitables».

Hay que tener en cuenta que si la luminosidad de una estrella K es, pongamos por caso, la cuarta parte de la del Sol, un planeta a su alrededor tendrá que estar a la mitad de la separación que hay entre la Tierra y el Sol para recibir la misma energía, pues esta decrece con el cuadrado de la distancia.

Considerando diversos factores, el astrónomo estadounidense Geoffrey Marcy (n. 1954) y otros han calculado que el 22% de las estrellas tipo Sol (GK) pueden tener planetas similares a la Tierra en sus zonas habitables. Como estiman en 40000 millones los «solos» en la Vía Láctea, habría unos 8800 millones de «tierras habitables» (en el universo, cientos de billones), muchas de ellas más antiguas que la Tierra. La más cercana podría estar a 12 años-luz.

Las estrellas de tipo M, entre las que se cuentan las enanas rojas, son las más abundantes con diferencia: el 75% del total. Por su larguísima vida, disponen de muchos miles de millones de años para la aparición y evolución de la vida. Al ser tan pequeñas, son poco luminosas, y los planetas habitables tendrán que estar más cerca. Por ejemplo, si la luminosidad de la estrella es 400 veces

¿VIDA EN TORNO A LAS ESTRELLAS MÁS MASIVAS?

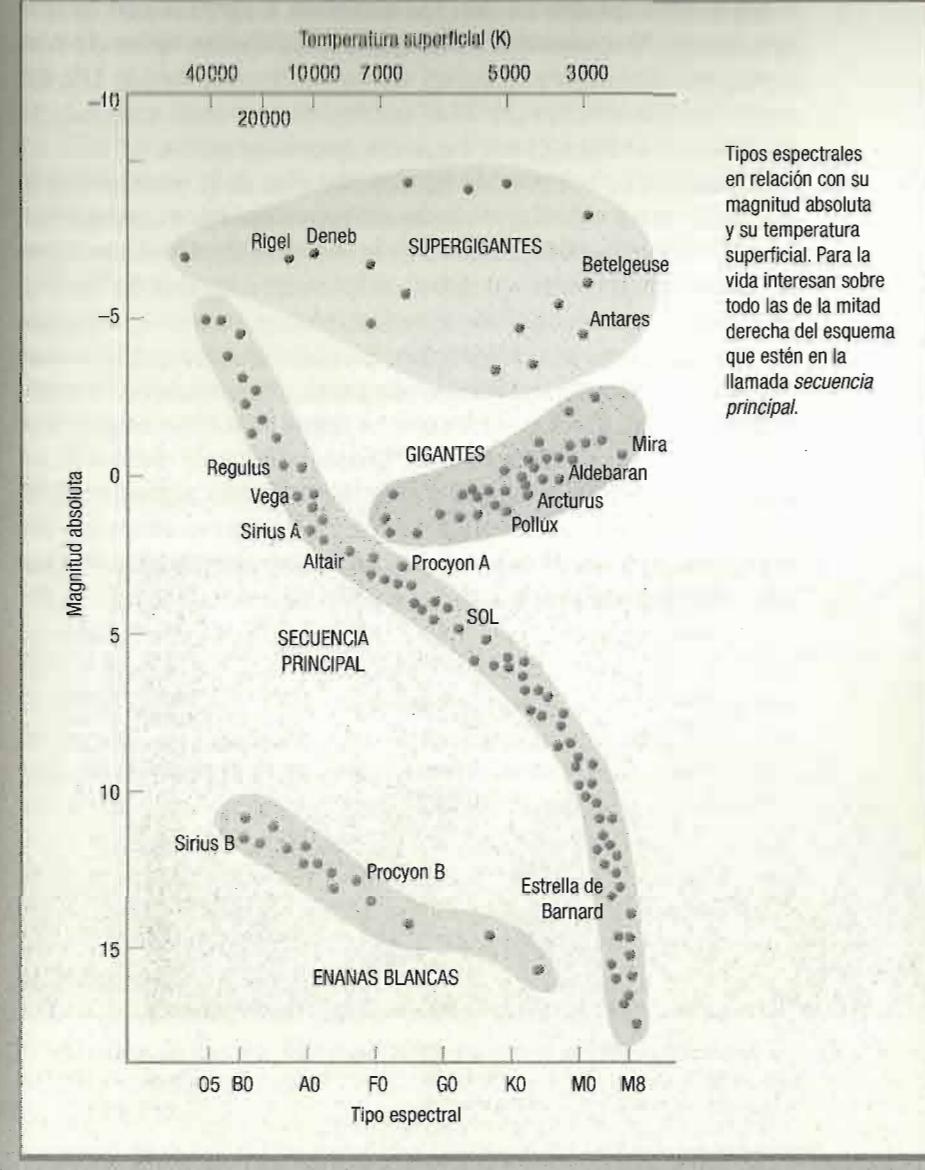
Cuanto más masa tenga la estrella, de más hidrógeno dispondrá para la fusión, pero, paradójicamente, menos durará, debido a la mayor rapidez con la que se fusionará su hidrógeno. Esto la hará también mucho más luminosa. Mientras que la disparidad entre masas puede ser de unos cientos de veces, las diferencias de luminosidad llegan a ser de millones. Y la vida estelar oscila entre menos de un millón de años (las más masivas y luminosas) y cientos de miles de millones de años (las más pequeñas y tenues).

Esperanza de vida estelar

Las estrellas de tipo O y B, con una vida media inferior a 50 millones de años, son tan efímeras que las descartamos de inmediato. En cambio, las A y las F tempranas (F0, F1, F2), con duraciones de entre 1 000 y 2 000 millones de años, sí podrían sostener planetas rocosos en los que se iniciara vida como la bacteriana y arqueana de la Tierra. Al ser estrellas más calientes que el Sol, sus ZH son más extensas, a la vez que más alejadas. Puede que su intensa radiación UV perjudique la vida superficial, pero no olvidemos la posibilidad de protección por atmósferas densas, y que tal vez con suficiente oxígeno la propia radiación UV genere un escudo de ozono. Tengamos presente además la eventual aparición de vida en las profundidades marinas y en satélites similares al joviano Europa. Pero si la vida más compleja se toma tanto tiempo en aparecer como en la Tierra, no llegaría a hacerlo en torno a las estrellas A y F tempranas. Hay que añadir que la suma de las estrellas O, B, A y F tempranas solo representa el 3% del total.



En esta ilustración artística vemos un probable planeta rocoso en la ZH de Eta Corvi (a la izquierda), una estrella F2 con un diámetro un 50% mayor que el del Sol, a solo 59,4 años-luz de nosotros, en la constelación del Cuervo. El telescopio espacial Spitzer encontró pruebas que sugieren impactos entre cometas, similares a los que se produjeron en el sistema solar hace unos 3 900 Ma, y un planeta rocoso en torno a la estrella.



Tipos espectrales en relación con su magnitud absoluta y su temperatura superficial. Para la vida interesan sobre todo las de la mitad derecha del esquema que estén en la llamada secuencia principal.

inferior a la del Sol, un planeta tendrá que localizarse veinte veces más cerca de su estrella de lo que está la Tierra del Sol (figura 4).

Un posible problema con las estrellas K tardías y M es que son enormemente activas durante sus primeros miles de Ma, y generan violentas emisiones de radiación, incluida la UV. En esas condiciones, los planetas perderían casi toda su atmósfera, aunque la vida submarina permanecería a salvo.

Otra dificultad es que, al estar los planetas de la zona habitable tan cerca de su estrella, el efecto gravitacional hace que se frene la rotación y acaben por mostrarle siempre la misma cara (un acoplamiento de marea, como el que tiene la Luna con la Tierra). Esa cara estaría siempre iluminada y tal vez demasiado caliente, y la otra, oscura y demasiado fría. En algunos casos podría estar casi todo el planeta helado (y, por tanto, blanco), salvo la zona más irradiada, generando lo que se llama una «tierra-ojo», por su parecido con un globo ocular. Quizá habría solo una estrecha franja habitable entre ambas zonas; sin embargo, algunos modelos de ordenador muestran que la circulación atmosférica ayuda, como «un sistema de aire acondicionado», a aliviar el contraste y mejorar la habitabilidad.

Dado que las estrellas M nacidas en los primeros miles de millones de años del universo hoy seguirán (salvo cataclismos) su curso, y dada su gran abundancia, podrían mantener las formas de vida más extendidas y antiguas del universo. Un estudio liderado por el astrónomo sueco Erik Zackrisson estima que en el universo observable hay unas $7 \cdot 10^{20}$ (700 trillones) «tierras» (con de 0,5 a 5 masas terrestres o de 0,8 a 1,5 radios terrestres) y «supertierras» (con de 5 a 10 masas terrestres o de 1,5 a 2,5 radios terrestres), de las que el 98% estarían en torno a estrellas M y «solo» unos 20 trillones en más parecidas al Sol (FGK).

Pero las estrellas M también podrían ser las principales incubadoras de nuevas generaciones de vida, pues son las estrellas que se siguen formando con más frecuencia. Se estima que el 92% de los planetas del universo está aún por nacer.

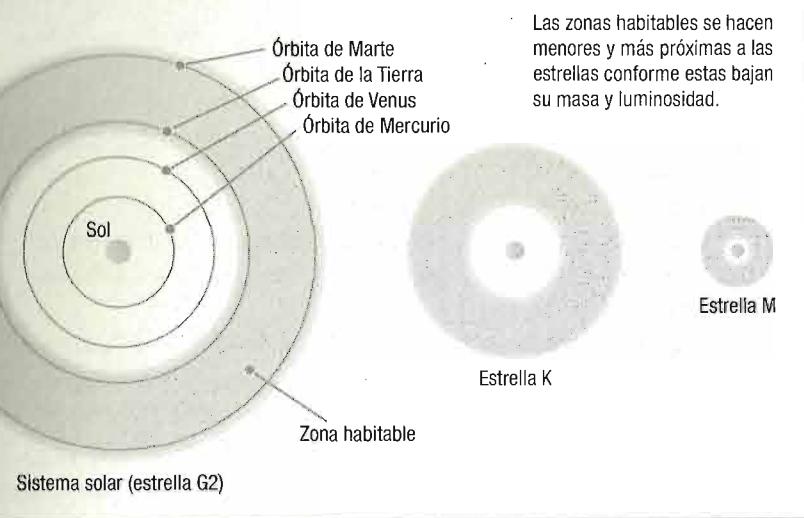
Vida en torno a enanas marrones o gigantes rojas

Las estrellas M más pequeñas (y más abundantes) tienen solo el 8% de la masa solar. Por debajo de esta masa límite, la gravedad es insuficiente para disparar la fusión del hidrógeno. Es el caso de los tipos L y T (que se añadieron, junto con otros, a la clasificación «clásica»), extremadamente fríos y de poca masa, que incluyen a las «enanas marrones». Como puede suponerse, son muy difíciles de detectar, pero ya empiezan a hacerlo los mejores telescopios de infrarrojos, que muestran que son muy comunes.

Aunque las enanas marrones pueden tener planetas a su alrededor, carecen de zonas habitables según la caracterización estándar. Sin embargo, algunos planetas y satélites podrían tener océanos subsuperficiales de agua líquida, con las posibilidades de vida que esto suponga.

De menor interés son las estrellas ricas en carbono, que se subdividen en R, N y S. Se trata de gigantes rojas —cuya superficie no supera los 2600 K— en el final de sus vidas. Dentro de unos 5000 Ma el Sol se convertirá en una de ellas; al multiplicarse su tamaño, tal vez englobe la órbita de la Tierra, pero en cualquier caso esta ya no albergará vida.

FIG. 4



Vida en sistemas estelares múltiples

Quizá la mayoría de las estrellas estén ligadas gravitatoriamente a otras constituyendo sistemas múltiples (binarios, triples, etc.). Por ejemplo, el sistema más próximo al Sol, Alfa Centauri, es triple. Se ha estimado que más del 60% de las estrellas de tipo solar pueden estar formando sistemas múltiples, y ya se han detectado planetas hasta en sistemas cuádruples. La frecuencia de la multiplicidad disminuye al hacerlo la masa estelar, de modo que en las estrellas M aquél porcentaje baja hasta el 25%.

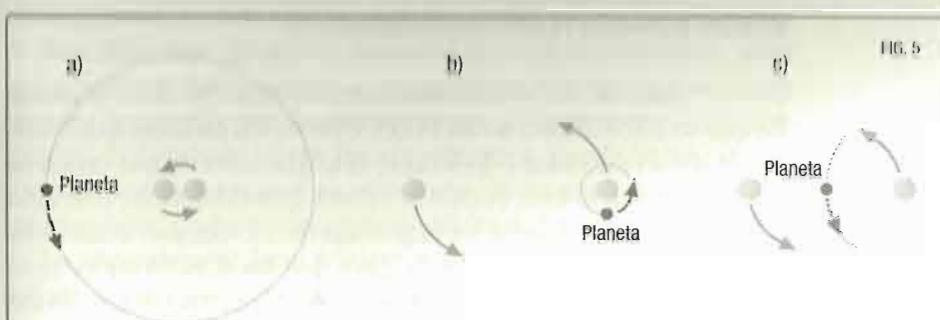
Dada la gran frecuencia de estos sistemas, nos preguntamos si podrán sostener planetas habitables. En los más comunes, los binarios, son posibles tres situaciones (figura 5).

En la primera (a), las dos estrellas están próximas y los planetas orbitan en torno a ambas, a una distancia bastante mayor (al menos 5 veces) de la que separa las dos estrellas. Para lo que aquí nos interesa, el dúo de estrellas casi equivale a una sola, y las órbitas planetarias serían generalmente estables.

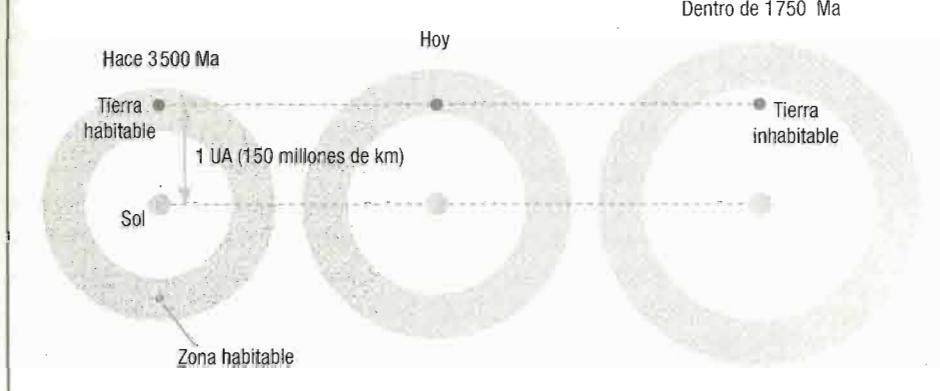
En la segunda (b), con las estrellas mucho más separadas, un planeta podría orbitar alrededor de una o de la otra sin que apenas la perturbara la más alejada. Según las simulaciones de ordenador, la situación es estable cuando la distancia entre las estrellas es de más de unas cinco veces la que separa el planeta de su estrella próxima.

Y en el tercer caso (c), cuando ninguna de las dos estrellas está mucho más alejada que la otra del planeta, es probable que este no alcance una órbita estable. El planeta experimentará el tirón gravitatorio de ambas, y el «*pas de deux*» estelar perturbará sus ciclos noche/día, la alternancia de las estaciones, las mareas y la cantidad de radiación recibida, convirtiéndolo en un mundo inhóspito. Hasta podría llegar a verse expulsado del sistema o absorbido por una de las estrellas.

Parece que la mayoría de los sistemas dobles entran en los dos primeros casos, por lo que deben poseer zonas habitables. Con más estrellas en juego, aumentan las situaciones posibles y su complejidad, pero ya puede el lector hacerse una idea de en qué casos sería más factible una habitabilidad duradera.



Diferentes configuraciones de sistemas binarios y la posible habitabilidad de un planeta que gire en su entorno.



Las zonas habitables se alejan con el tiempo. La Tierra acabará fuera de la solar en unos 1750 Ma.

Naturalmente, la zona habitable depende no solo del tipo de estrella, sino de su edad. A lo largo de la vida de una estrella, esta se hace más luminosa y la ZH se va alejando hasta desaparecer cuando la estrella se convierte en una enana blanca. Por eso se habla también de ZH «continuada», y será adecuada la que se mantenga un tiempo «suficiente» para el desarrollo de la vida. Se calcula que la Tierra saldrá de la ZH dentro de unos 1750 Ma, con un Sol un 18% más luminoso que ahora (figura 6); se espera que los océanos se evaporen y que la extinción sea, si no total, masiva.

RETRATO DE LOS PLANETAS HABITABLES

Que un planeta sea potencialmente habitable no solo depende de que se encuentre o no en la ZH. Uno de los factores a considerar es la excentricidad (e), es decir, el alejamiento de una órbita de la circularidad. Si $e=0$, la órbita es una circunferencia, mientras que con una e de 1 sería un segmento recto. Algunos autores dicen que e debe ser inferior a 0,2 para que las diferencias de temperatura verano/invierno no sean excesivas, pero no es un criterio muy riguroso. La Tierra tiene una excentricidad de solo 0,017, tan pequeña que su efecto es mínimo sobre las diferencias de temperatura estacionales; de hecho, en el hemisferio norte el invierno coincide con un mayor acercamiento al Sol.

También se ha especulado con la idoneidad del periodo de rotación para que las temperaturas no cambien demasiado entre el día y la noche, pero no hay un valor límite, e incluso la ausencia de rotación respecto a la estrella no tiene —como hemos visto— por qué ser esterilizadora.

En cuanto a las características de los propios planetas, se han encontrado de todas las masas y tamaños, y sin duda son de muy variadas temperaturas, presiones superficiales, composiciones, campos magnéticos, etc. También se hallan en una diversidad de contextos. Veamos los aspectos que parecen más conspicuos.

La clave: tener la masa, el tamaño y la atmósfera adecuada

Como la capacidad de un planeta para desarrollar y albergar vida parece esfumarse cuando se trata de un gigante gaseoso sin una superficie sólida hospitalaria, desecharemos de los «minineptunos» (con una masa similar a las supertierras, pero con una gran envoltura gaseosa) en adelante. Por el contrario, un cuerpo demasiado pequeño (una «minitierra», con menos de la mitad de la masa terrestre) no podrá retener una atmósfera con las moléculas volátiles de los elementos biogénicos, y tampoco una hidrosfera (mares y otras masas y corrientes de agua) estable, aunque cabrían mares subsuperficiales. Sí pode-

mos esperar, en cambio, atmósferas en las tierras, supertierras y «megatierras» (planetas mayores que las supertierras, pero no gaseosos; habrá super- y megatierras con tanta atmósfera que su distinción de los minineptunos y «neptunos» será arbitraria). Sobre todo entre las supertierras, puede haber «mundos-océano» en los que el agua cubra todo el planeta con una profundidad de hasta decenas de kilómetros.

La naturaleza de la atmósfera es clave para que se genere un efecto invernadero, con el calentamiento subsiguiente del planeta, que puede favorecer la presencia de agua líquida superficial (caso de la Tierra) o su evaporación excesiva (caso de Venus). En la Tierra, el efecto invernadero, debido sobre todo al vapor de H_2O y, en menor medida, al CO_2 y otros gases, aumenta la temperatura media en unos 40 °C.

Se espera que el dihidrógeno (H_2) forme parte de los gases atmosféricos primordiales de todos los planetas, pero los relativamente pequeños (como Venus, la Tierra y Marte) son incapaces de retenerlo, mientras que los más masivos, fríos y alejados del *viento estelar* sí lo harán, creando un ambiente más reductor (al haber mayor predominio del hidrógeno frente al oxígeno). La astrofísica canadiense Sara Seager (n. 1971) argumenta que el H_2 es un gas de efecto invernadero formidable, de modo que los planetas que lo conserven podrán mantener temperaturas más altas, y en consecuencia agua líquida mucho más lejos de su estrella, extendiendo el límite externo de la ZH. ¿Cuánto? Seager calcula que unas 10 UA e incluso mucho más, pues hasta los que fueron expulsados de su «tiovivo planetario» y aparecen totalmente desvinculados de estrella alguna, conocidos como planetas «salvajes» o «huérfanos», podrían mantenerse suficientemente calientes. Parece haber muchos planetas así, y se les puede llamar también «errantes» o «vagabundos», si bien supone una redundancia, dada la etimología griega de «planeta», que significa precisamente eso. Lógicamente, en las supertierras próximas a su estrella (como 55 Cancri e), el H_2 atmosférico no interesa porque se sobrecalentarían.

El límite interno de la ZH está controlado por otro gas de fuerte efecto invernadero, el H_2O . Seager considera que puede haber planetas habitables mucho más cercanos a sus estrellas (hasta 0,5 UA

para las de tipo solar) del límite inferior de Kasting (0,99 UA) siempre que sean «relativamente» secos, ya que esto evita el efecto invernadero desbocado causado por el vapor de agua. Pero no deben ser «extremadamente» secos, pues entonces el CO₂ no se eliminaría de la atmósfera y occasionaría el sobrecalentamiento. El problema para nosotros podría ser la detección de su poca agua, si la usamos como criterio previo de habitabilidad.

Vemos así que la denominada habitabilidad es una característica muy específica de cada planeta, y que, con ciertos supuestos, la ZH puede ir de 0,5 a más de 10 UA, en lo que se refiere a la superficie de los planetas rocosos (figura 7). En definitiva, dado que la información necesaria para estimar la habitabilidad de los cuerpos concretos (como si tienen una tectónica de placas o un campo magnético) será difícil de obtener, no existe una definición de ZH rigurosa y universal, pero la estándar vale como primera y cautelosa aproximación.

La masa es un factor que también influye en que el planeta posea o no un campo magnético. Para muchos este campo es fundamental para la vida, o al menos muy beneficioso, porque genera un escudo protector frente a las partículas del viento estelar, que pueden erosionar la atmósfera —llevándose sobre todo los componentes más ligeros— y dañar directamente a los seres vivos.

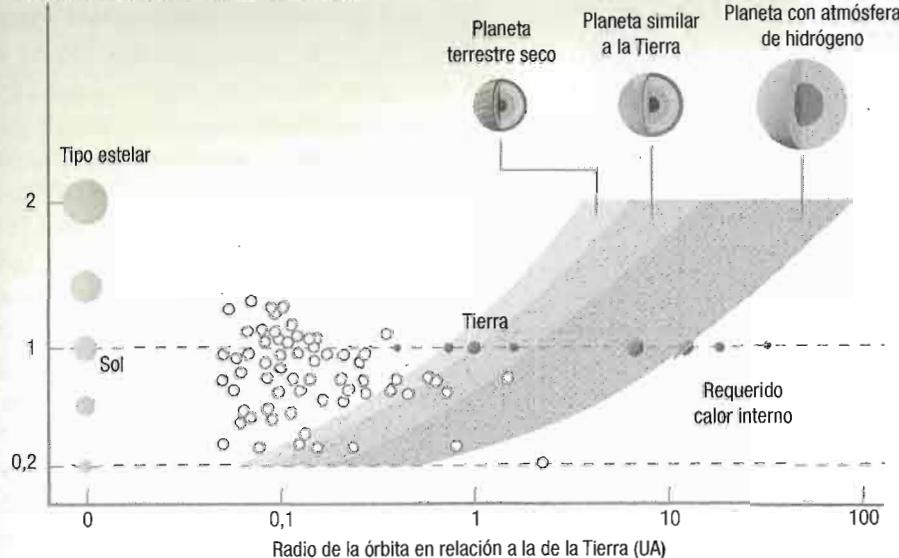
¿Planetas «protectores»? Según cómo se mire

Hay quienes aseguran que la existencia de grandes planetas gaseosos, Júpiter en particular, ha protegido notablemente a la Tierra de impactos deletéreos, al atraer numerosos cuerpos hacia sí gracias a que su masa es mucho mayor. Según ciertos modelos, poco después de la formación de la Tierra, los planetas gigantes arrojaron billones de cometas desde el interior del sistema solar al espacio interestelar. Calculan que, sin Júpiter, habría habido del orden de mil veces más cometas chocando contra la Tierra, con efectos nefastos sobre todo para la vida compleja.

Sin embargo, se ha puesto en entredicho ese Júpiter protector, pues los cometas solo representan una fracción pequeña

FIG. 7

Masa de los estrellas en relación a la del Sol



La zona habitable estelar. La banda donde vemos a la Tierra representa la zona habitable «convencional» para planetas con atmósferas ricas en N₂, CO₂ y H₂O, y sin nubes. La región más clara a la izquierda sería habitable para planetas secos. La más oscura a la derecha sería habitable para planetas con atmósferas ricas en hidrógeno. Se muestra la posición de diversos exoplanetas de tamaño similar al terrestre.

del flujo total de impactos, que está dominado por los asteroides. Y el cinturón de asteroides probablemente existe porque el efecto gravitacional de Júpiter evitó la acreción de esos objetos para dar origen a un planeta. De modo que, sin Júpiter, el flujo de caída de asteroides sobre la Tierra habría sido mucho menor. También sabemos, lo que sirve de ejemplo ilustrativo, que el cometa Lexell pasó en 1770 muy cerca de la Tierra debido a la influencia joviana.

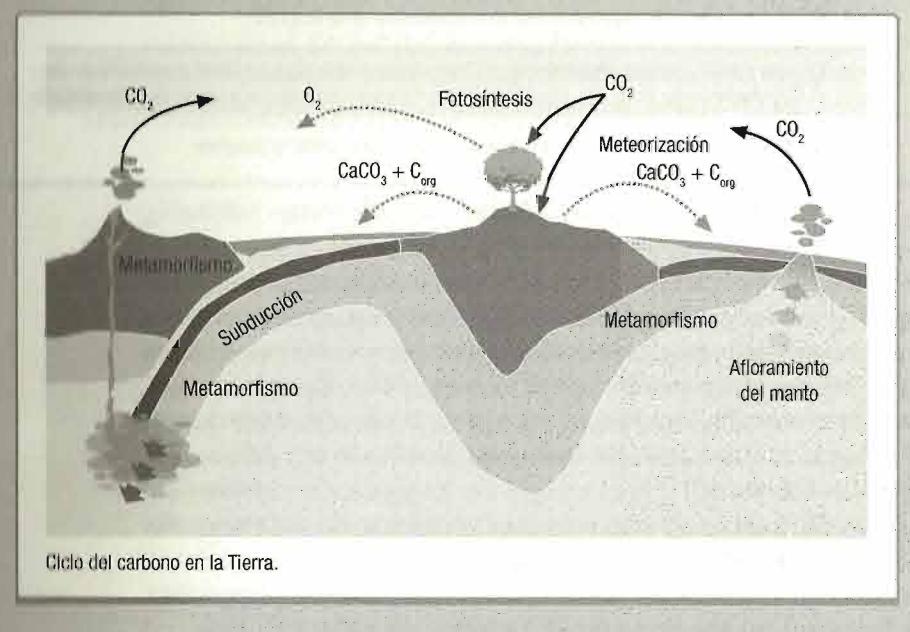
Por otro lado, no olvidemos que los asteroides y sobre todo los cometas contienen agua y compuestos orgánicos de interés probiótico, de modo que no sabemos qué es definitivamente más favorable para el surgimiento de la vida.

¿SE NECESITA LA TECTÓNICA DE PLACAS?

La masa es uno de los factores que intervienen en que el planeta tenga o no una tectónica de placas, es decir, un movimiento superficial de placas corticales sólidas sobre un manto fluido. Para impulsarla se necesita una fuente de calor interno; en el caso de la Tierra, ese calor procede del remanente de la formación planetaria y de la desintegración radiactiva. Con una masa planetaria pequeña, el núcleo se enfria demasiado pronto, y por tanto no se desarrolla una tectónica de placas, o se pierde. La planetóloga colombiana Diana Valencia y sus colegas de la Universidad de Harvard defienden que la tectónica de placas será común en los planetas de tamaño igual o, mejor, superior a la Tierra, y que estos últimos pueden ser «superhabitables», las mejores apuestas para encontrar vida. Hay más fuentes de calor para sustentar la tectónica de placas, como el generado por la enorme energía de las mareas inducidas por un gigante gaseoso sobre sus satélites próximos (como ocurre con Júpiter e Io, Europa...).

La influencia sobre el carbono

La importancia de la tectónica de placas para la vida se debe a su influencia sobre el ciclo del carbono y el clima. En la Tierra, el CO_2 atmosférico se mantiene en unos niveles adecuados para la mayor parte de los organismos gracias a un ciclo autorregulado. Este incluye la eliminación de CO_2 atmosférico por las lluvias y su precipitación como carbonatos; después, gracias a la tectónica, estos acaban bajo la corteza y devuelven el CO_2 a la atmósfera mediante la actividad volcánica.



Influyentes satélites de compañía

La Luna es un satélite de tamaño notable, originado tras el impacto de un planeta similar a Marte contra la Tierra al final de su formación. Debido a sus considerables masa y proximidad, pudo tener incidencia en el origen de la vida por su contribución a las mareas, generadoras de charcas de interés probiótico. Pero tiene otro efecto tal vez de mayor alcance. Se ha argumentado que si la Luna no existiera, la orientación del eje de rotación de la Tierra experimentaría grandes variaciones caóticas (de hasta 85°) en el curso del tiempo, a semejanza de lo ocurrido en Marte. En ese caso, podría haber períodos en los que un polo terrestre estaría recalentado bajo un Sol permanente, mientras que el otro permanecería muy frío, sumido en una noche continua. Recorremos que ligeras variaciones de oblicuidad del eje de rotación ($1,3^\circ$) pueden bastar para explicar las glaciaciones. Además, el efecto de marea ha ido frenando la rotación terrestre, haciendo los días más largos. La Luna actuaría, pues, de regulador climático para la Tierra, garantizando una estabilidad favorable para el desarrollo de la vida. Como se calcula que lunas tan grandes como la nuestra son infrecuentes, Ward, Brownlee y otros utilizan estos datos a favor de su «Tierra rara».

Sin embargo, los modelos más recientes del astrónomo estadounidense Jack Lissauer (n. 1957) y sus colegas muestran que el efecto estabilizador de la Luna se había exagerado, pues sin ella la oscilación del eje no pasaría de los 20° gracias a la influencia benéfica de los gigantes gaseosos, sobre todo Júpiter. Y si este estuviera más cerca, el efecto de la Luna sería desestabilizador. En definitiva, la presencia de una luna como la nuestra en torno a los exoplanetas no parece decisiva para que aparezca o no la vida, aunque podría tener efectos sobre la evolución, sobre todo la de la vida compleja. Respecto a la proposición de la «Tierra rara», lo que es obvio es que hay muchos detalles azarosos (contingencias) que han afectado a la evolución de la vida en la Tierra, pero no se demuestra que fueran cruciales para la vida, sobre todo porque no se analiza qué otras posibles vías habrían aparecido, o si en ocasiones

habrían convergido (al menos hasta cierto punto) con la que se tomó.

¿HAY VIDA MÁS ALLÁ DE LAS ZONAS HABITABLES?

Parece que podría ser. Existen varias maneras por las que puede haber vida fuera de las zonas habitables estándar. Casi todas parten del supuesto de que la luz quizás no sea esencial para su desarrollo. Los planetas que retengan H_2 en su atmósfera gracias a su gran tamaño y a la lejanía del viento estelar, podrían tener agua líquida superficial y ser habitables mucho más allá de la ZH. Incluso los planetas salvajes. La abundancia de estos se desconoce, pero puede ser considerable. Lástima que sean de difícil detección.

Procesos similares a los que ocurren en las surgencias hidrotermales terrestres, derivados de la formación planetaria, de la radiactividad y, en satélites de grandes planetas, de las inmensas fuerzas de marea, promueven océanos subsuperficiales (como los de los satélites galileanos de Júpiter y del saturniano Encélado) y podrían impulsar la aparición de vida. Hasta cabría hablar de «zonas habitables mareales» alrededor de los gigantes gaseosos. Aparecen a cualquier distancia de la estrella, fuera de la ZH estándar.

Finalmente, no olvidemos la posibilidad de planetas o satélites con otros medios líquidos, como ocurre en Titán. Se habla, por ejemplo, de una «zona de habitabilidad del metano», que se localizaría mucho más alejada de la estrella que la correspondiente al agua.

Teniendo en cuenta todo esto, hasta es posible que la mayor parte de los mundos potencialmente habitables estén fuera de las ZH estándar. Pero no cabe duda de que nuestra capacidad de detectar vida en ellos es mucho menor, y es probable que las limitaciones energéticas y otras condiciones no sean idóneas para la evolución de vida compleja. Por todo ello, seguiremos prestando especial atención a las zonas habitables convencionales.

Búsqueda y expansión de la vida en el sistema solar

La búsqueda de vida fuera de la Tierra puede ser mucho más directa allá donde podamos realizar análisis más exhaustivos, e incluso tomar muestras. Estas posibilidades se ciñen al sistema solar. Parecía que aquí no había mucho que esperar, pero los sorprendentes hallazgos de los últimos años despiertan grandes expectativas.

Siguiendo unos criterios muy generales (existencia de fuentes de energía, elementos biogénicos y disolventes), hay muchos sitios donde buscar vida en el universo en general, pero también en nuestro entorno más próximo. Ya no esperamos encontrar marcianos humanoides, sino que las expectativas se ciñen a formas de vida sencilla, seguramente microscópica. Podríamos detectarla bien de forma directa, bien por sus manifestaciones químicas o energéticas. Pero, hasta que eso sea posible, debemos analizar si las «condiciones» son las adecuadas para el desarrollo o la permanencia de la vida. Es decir, si hay o se pueden formar moléculas probióticas, y se dispone de una fuente de energía y un adecuado medio líquido.

Las energías lumínica y química (esta última tal vez ligada a un ambiente geotérmico) parecen las más efectivas para impulsar procesos biológicos. La lumínica llega a la superficie de todos los cuerpos del sistema solar, pero en menor medida conforme nos alejamos del Sol.

El ambiente químico propicio supone sobre todo la existencia de suficiente carbono, en particular en forma de moléculas orgánicas (con C y H). Además, será favorable la presencia de

ciertos niveles de compuestos con O, N, S y P, de cara a conseguir la complejidad química requerida. Lo que ocurre es que su relativa abundancia no es nada especial, pues, sobre todo los cuatro primeros («CHON») son de los más abundantes en el universo. Como en el caso de la Tierra, los compuestos probióticos pueden estar presentes por síntesis *in situ* (en la superficie o en las profundidades oceánicas), o por haber llegado desde el espacio procedentes de meteoritos y cometas que ya los tienen y que los habrán dispersado por todos los cuerpos del sistema solar. Es decir, todos estos cuerpos tendrán un mínimo de esos compuestos probióticos, salvo que se destruyan activamente.

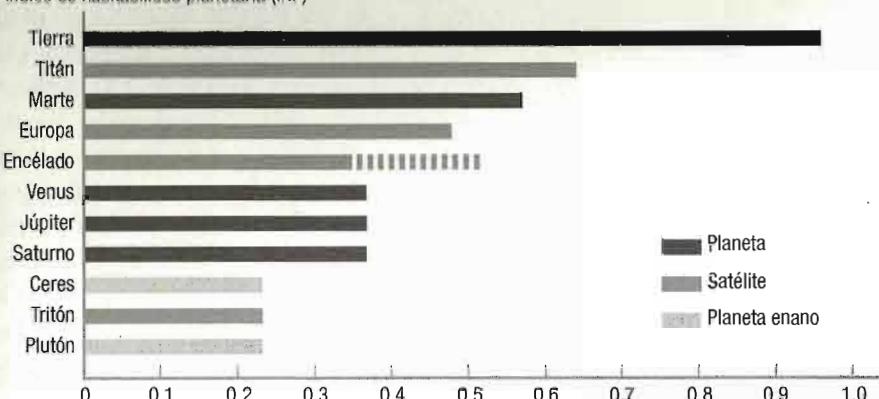
Para que esas moléculas lleguen a generar vida parece imprescindible un medio líquido adecuado, en la superficie o bajo ella, preferentemente participando de *interfases* con sustratos sólidos, como los silicatos o las piritas. El medio líquido parece el requisito más limitante, pues cabe esperar que casi cualquier mundo que lo posea, cumplirá también los otros. Aunque no siempre: un océano emparedado entre capas de hielo es poco prometedor, pues carecería de las interfases y los desequilibrios necesarios.

Con esta salvedad, suele seguirse un criterio de habitabilidad simple, necesario pero no suficiente: un mundo se considera «habitável» solo si tiene un medio líquido adecuado, preferentemente agua, pero sin descartar los otros que hemos indicado (como el amoníaco, los hidrocarburos sencillos, etc.). Este requisito lo cumplen o lo han cumplido diversas localizaciones del sistema solar.

Basándose en consideraciones como las anteriores, el astrobiólogo Schulze-Makuch y otros propusieron en 2011 una medida, el índice de habitabilidad planetaria (IHP), para evaluar la habitabilidad de los planetas y sus lunas, y priorizar la investigación ulterior de los de mayor índice. El IHP se basa, en consonancia con lo que venimos diciendo, en parámetros relacionados con la variedad de elementos químicos y con las características físicas; por ejemplo, la presencia de un sustrato sólido, la disponibilidad de energía, un ambiente químico propicio y la presencia de líquidos. Cuando calcularon el IHP relativo (ajustando a

FIG. 1

Índice de habitabilidad planetaria (IHP)

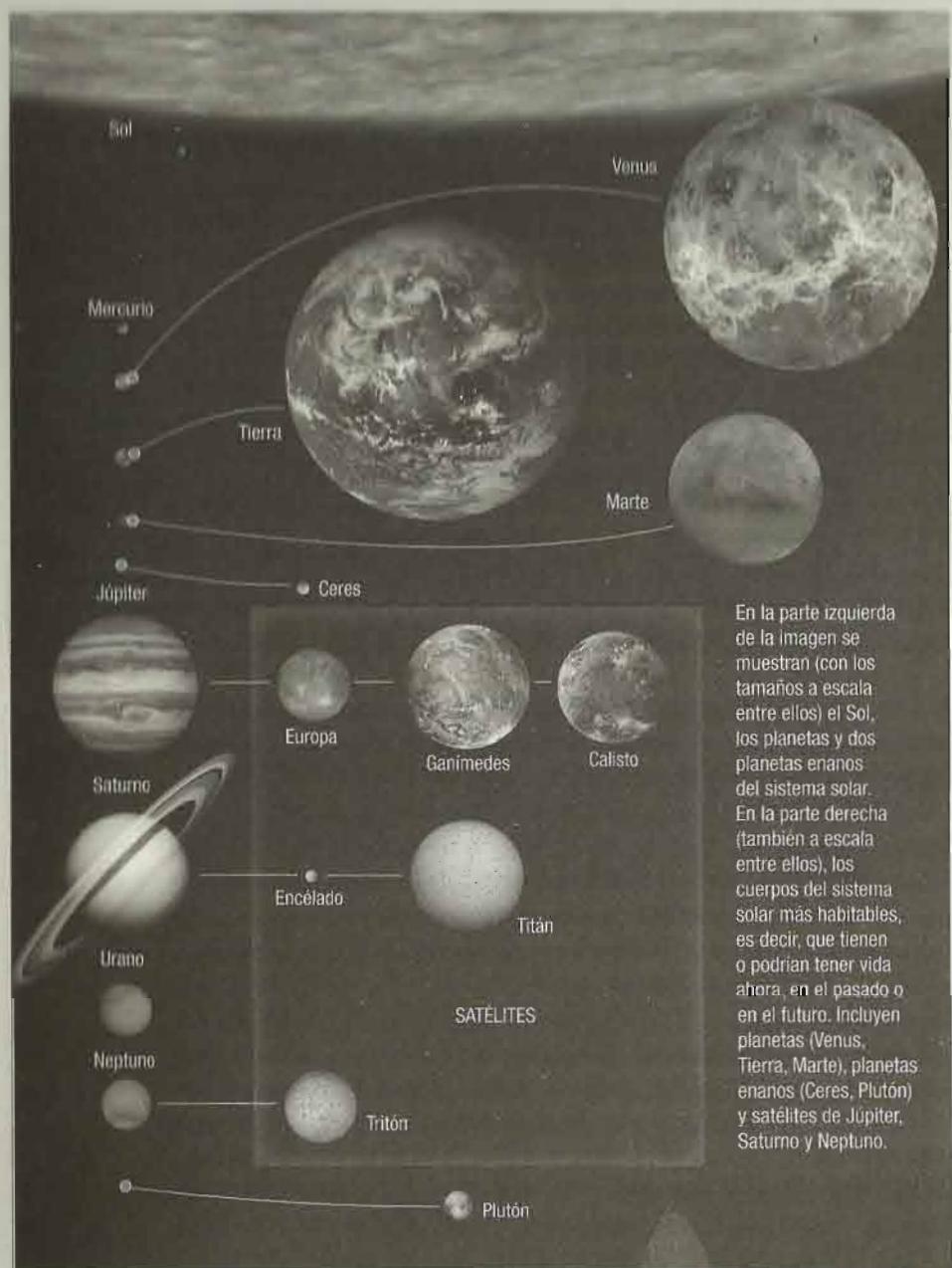


IHP de algunos cuerpos destacados del sistema solar, según Schulze-Makuch y otros (2011). La extensión discontinua de la barra de Encélado se debe a que los autores consideran que la habitabilidad de este satélite queda subestimada en el IHP por la falta de algunos datos, pero que podría estar a la altura de Europa o Titán.

1 el mayor valor posible) dentro del sistema solar, después de la Tierra (0,96) Titán obtuvo la puntuación más alta con 0,64, seguido de Marte (0,59) y Europa (0,49) (figura 1).

Al mismo tiempo propusieron un Índice de Similitud Terrestre (IST) para premiar las características más similares a la Tierra, ponderando parámetros como la densidad, la distancia entre el cuerpo celeste observado y su estrella, o su tamaño, entre otras consideraciones. Según el IST tras la Tierra (1,0), destacan Marte (0,70), Mercurio (0,60), la Luna (0,56) y Venus (0,44). Enseguida se percibe que el IST es de menos utilidad que el IHP para los cuerpos del sistema solar. Tiene mayor relevancia para los exoplanetas, de los que se poseen pocos datos sobre habitabilidad.

Con todo el interés que puedan suscitar estos índices, en el caso de los cuerpos del sistema solar tenemos la posibilidad de dar el siguiente paso, es decir, averiguar si efectivamente hay vida en ellos, o al menos obtener huellas de probable actividad biológica (véase la imagen de la página siguiente).



VIDA EN VENUS

Venus, un planeta poco más pequeño y menos masivo que la Tierra, tiene gran escasez de agua. Si se condensara toda la que hay en su atmósfera, formaría una capa de unos 3 cm de profundidad, frente a los 3 km que tendría si hubiese tanta agua como en la Tierra.

Los problemas del «segundo planeta» proceden de su cercanía excesiva al Sol (tras Mercurio es el más próximo). Pero eso no es todo, pues su temperatura superficial (464 °C de media), mucho mayor que la de Mercurio, es «demasiado» alta, muy superior a la esperada por la distancia al Sol. La razón es un efecto invernadero desbocado que eleva la temperatura unos 500 °C. Hoy la atmósfera venusiana inferior tiene un 96% de CO₂, un 3,5% de N₂, y una presión atmosférica 90 veces superior a la terrestre.

Todo ello se debe a que ha sufrido un ciclo de pérdida de agua. Al recibir una radiación solar doble que la Tierra, el agua se evaporó mucho más. El gran efecto invernadero causado por el agua calentó mucho la superficie, liberándose aún más agua a la atmósfera, y el efecto invernadero se disparó. En la atmósfera superior, la radiación UV rompió (*fotodisoció*) el agua liberando hidrógeno que se escapó al espacio, mientras el oxígeno iba reaccionando con compuestos de la superficie. Además, el notable campo eléctrico recién descubierto en la atmósfera venusiana pudo contribuir a la expulsión al espacio de los iones de H y de O. Y así se fue perdiendo más y más agua, y los océanos se fueron desecando. Al no mantenerse agua líquida en la superficie, no funcionó el mecanismo por el que el CO₂ se elimina de la atmósfera convirtiéndose en rocas carbonatadas, y se acumuló en la atmósfera, aumentando el efecto invernadero. (Recordemos que, con el lento calentamiento del Sol, se teme que la Tierra corra una suerte parecida a la de Venus en unos 1 750 Ma.)

Hoy día puede haber una zona en la atmósfera venusiana presumiblemente habitable situada a unos 50-60 km de altura. Ahí la temperatura está entre -20 °C y +70 °C, la presión es de alrededor de 1 atm, hay nubes muy ricas en ácido sulfúrico e indicios de desequilibrio químico. Ese ambiente podría ser compatible con

microorganismos *termoacídofilos* terrestres, que harían uso de la luz UV o de compuestos de azufre como fuente de energía.

Diversos autores han presentado pruebas y argumentos (básados en los datos de la sonda Venus Express) en favor de que hace unos miles de millones de años, cuando el Sol era más frío y su zona habitable estaba más cercana, Venus también tuvo océanos o lagos, tal vez durante varios cientos de millones de años. De ser así, pudo surgir la vida y luego verse recluida a nichos estables, acaso en las nubes ácidas. De hecho se ha detectado un compuesto, el sulfuro de carbonilo (OCS), que se considera difícil de producir abióticamente, y algunos lo explican como consecuencia de la actividad de seres vivos. Si estos hubieran hecho uso de la radiación UV se explicaría además la presencia de «misteriosas» manchas oscuras en las imágenes de Venus en el UV.

LA HABITABILIDAD DE MARTE

El «cuarto planeta», «el planeta rojo», es el astro que más ideas de civilizaciones extraterrestres ha evocado. Hablar de «marcianos» llegó a ser algo tan familiar como si realmente los hubiéramos conocido alguna vez. Los datos proporcionados por la sonda Mariner 4 en 1965 fueron un gran jarro de agua fría; unos pretendidos «canales» artificiales dieron paso a un paisaje desolado, áridos desiertos salpicados de cráteres de impacto. Pero aún había esperanzas de algún tipo de vida, incluso de plantas o animales «primitivos». Estas ilusiones también parecieron esfumarse con los resultados de las sondas Viking en 1976 —aunque luego los revisaremos—.

Sin embargo, seguimos preguntándonos si Marte tuvo vida alguna vez e incluso si la hay, «oculta», en la actualidad. Cabe aún la posibilidad de una respuesta positiva, que sería extraordinariamente apasionante, y del máximo interés desde el punto de vista científico. La cuestión sigue en el aire debido a que la profusión de nuevos datos científicos obtenidos por las decenas de misiones espaciales exitosas, aún no responde a las preguntas clave. La pequeña masa de Marte (1/10 de la terrestre) determina una

gravedad (el 38% de la nuestra) incapaz de retener una atmósfera densa. Y recibe la mitad de luz solar que la Tierra. Su muy baja temperatura (-46°C de media), una atmósfera muy tenue (con una presión de menos del 1% de la terrestre) y la ausencia de agua líquida permanente en la superficie, hacen que esta no parezca compatible con la vida. Más aún, la ausencia de una capa de ozono permite la llegada de una dañina radiación UV que, junto a la radiación cósmica y la presencia de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y percloratos (ClO_4^-), pueden destruir la materia orgánica.

La historia del agua marciana

Hay pruebas de que, al menos ocasionalmente, ha habido abundancia de agua líquida en Marte. Para empezar, contamos con pruebas visuales de dos tipos de «canales». Unos son valles anchos que se interpretan como productos de grandes flujos de líquidos que circulaban rápidamente por la superficie. Otros son canales sinuosos de lo que constituiría una red fluvial muy ramificada a lo largo de cientos de kilómetros, sobre todo en el hemisferio sur. En los dos casos, el líquido solo pudo ser agua.

Además, las fotografías obtenidas por la Mars Global Surveyor en 2006 mostraron los efectos de flujos de agua líquida muy recientes (de menos de diez años). Y en 2015 las imágenes obtenidas por la sonda Mars Reconnaissance Orbiter han probado la presencia de agua líquida salada durante los meses de verano, cuando la temperatura ronda los 20°C .

Todo indica que Marte fue más cálido y húmedo en el pasado. Los más optimistas calculan que hace 3800 Ma habría suficiente agua para sostener océanos de más de 1 km de profundidad; incluso hay pruebas recientes que apuntan a que dos impactos de asteroides sobre un gran océano del norte del planeta causaron sendos tsunamis gigantescos hace unos 3400 Ma. Los menos, creen que el agua normalmente estaba congelada y solo alguna vez se fundía a causa de la actividad volcánica o de cambios en la inclinación del eje de rotación de Marte. En todo caso, ¿dónde fue a parar esa agua?

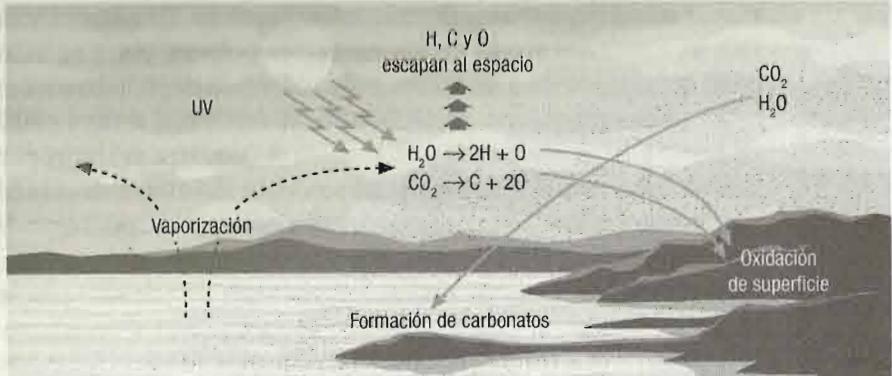
Hasta hace unos 3800 Ma, Marte debió de tener una atmósfera rica en CO₂ gracias, sobre todo, a una actividad volcánica como la que originó el monte Olimpo (la mayor montaña del sistema solar, con 27 km sobre la elevación media). Debido al CO₂, la presión atmosférica sería superior a la terrestre actual, y la temperatura media estaría por encima de los 0 °C. Abundaría el agua líquida y se generarían las grandes cuencas fósiles. Pero se duda si el agua estaba presente de manera continua durante decenas o incluso cientos de millones de años, o solo de forma esporádica. En cualquier caso, pudo aparecer la vida.

En los siguientes centenares de millones de años, el CO₂ atmosférico se fue perdiendo, en parte debido a la formación de carbonatos. El problema de los planetas pequeños como Marte es que se enfrián antes que los grandes, y eso inhibe su vulcanismo y la salida de gases a la atmósfera. En la Tierra, el CO₂ atrapado en forma de carbonatos acaba reciclando a la atmósfera gracias al vulcanismo, pero en Marte no pudo ocurrir. Hoy Marte está geológicamente muerto. Sin embargo, recientemente se ha estimado que los carbonatos visibles en todo el planeta son muy insuficientes para dar cuenta de todo el CO₂ que habría cuando se formaron los valles fluviales.

¿Dónde fue a parar el resto del CO₂? Probablemente se perdió en el espacio, sobre todo hace unos 3000 Ma. El CO₂ se debió de «romper» debido a la radiación UV, lo que liberaría átomos de carbono y oxígeno, y estos, posiblemente, se verían arrastrados al espacio por el viento solar (figura 2).

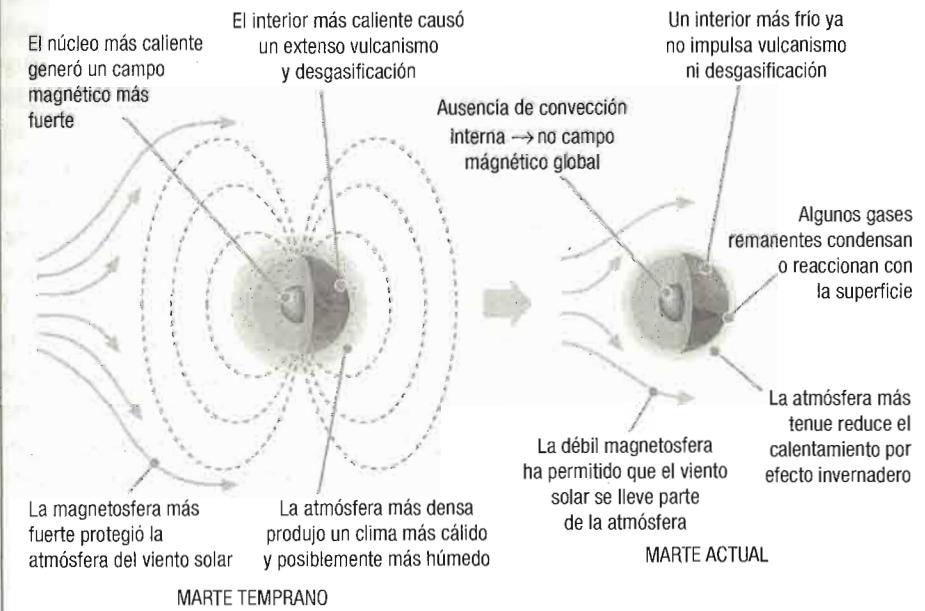
Esta pérdida se relaciona, además, con el campo magnético marciano. Marte probablemente tuvo un núcleo de metales fundidos, a semejanza del terrestre actual; los movimientos de convección de este núcleo, junto con la rotación marciana, generarían un campo magnético suficiente para formar una magnetosfera que protegiera a la atmósfera de las partículas del viento solar. El campo magnético se debilitaría al enfriarse el planeta y cesar la convección del núcleo, dejando la atmósfera a merced del viento solar, que la arrastraría en buena medida al espacio (figura 3). Por si eso fuera poco, los impactos también irían erosionando la atmósfera.

FIG. 2



La rotura por UV del CO₂ y del H₂O fue eliminando estos compuestos de Marte.

FIG. 3



Hace unos 3000 Ma, Marte pudo perder su campo magnético, dejando su atmósfera vulnerable al viento solar.

Además, se congelaría CO₂ en las capas altas de la atmósfera, con lo que se reflejaría más radiación hacia el espacio (es decir, un mayor albedo) y bajaría aún más la temperatura. Otra fracción del CO₂ se condensó y está en los casquetes polares, parte se incorporó químicamente a las rocas, y algo permanece en la atmósfera.

El agua sufriría una pérdida similar, mediante rotura causada por UV en átomos de H y O, seguida de arrastre del hidrógeno por el viento solar. El oxígeno procedente del CO₂ y del H₂O se perdería en parte por el mismo viento solar, y el resto reaccionaría con rocas de la superficie, contribuyendo a que podamos hablar del planeta «rojo», un tono generado principalmente por la oxidación del hierro.

Se estima que el agua líquida pudo ser estable hasta hace 3000 o quizás incluso 2000 Ma. Entonces, la presión atmosférica y la temperatura superficial aún serían considerablemente mayores a las actuales. Cuando las temperaturas máximas bajaron de 0 °C y el agua líquida desapareció de la superficie, si había vida, al menos ahí se extinguió. Si la extinción fue total, todo lo que podríamos encontrar hoy son restos fósiles. Fue muy popular el hallazgo, en el meteorito de origen marciano ALH84001, de supuestos vestigios de organismos y de actividad biológica (que también se hallaron en los meteoritos Nakhla y Shergotty). Sin embargo, todo lo que se encontró podía tener una explicación inorgánica, de modo que está pendiente la búsqueda de fósiles verdaderos.

En definitiva, la pérdida de gran parte del CO₂ y H₂O atmosféricos fue resultado del pequeño tamaño de Marte, que ocasionó su enfriamiento temprano. El planeta rojo solo es grande para retener durante un tiempo limitado el calor interno que impulsa el vulcanismo y la desgasificación.

Pero aún queda agua en Marte. Subsiste, como sabemos, en los casquetes polares, y se piensa que el suelo tiene atrapada una gran cantidad de agua helada, a lo largo de miles de metros de profundidad. Incluso puede aparecer ocasionalmente agua líquida superficial. El eje de rotación de Marte sufre grandes cambios de inclinación, y cuando esta es acusada propicia un calentamiento de las zonas del planeta más expuestas al Sol. En esos períodos, el vapor de agua puede alimentar el efecto invernadero y es posible

que el agua líquida «vuelva» a la superficie con cierta abundancia, y, de existir vida en el subsuelo (quizás en animación suspendida durante millones de años), también esta podría «retornar».

PERO... ¿HAY HOY VIDA EN MARTE?

Tal vez la eventual vida marciana resista en nichos muy localizados. Hay dos que parecen más interesantes. En la roca roja sedimentaria, a pocos centímetros bajo la superficie, y quizás hasta a decenas o cientos de metros de profundidad, puede haber agua y comunidades semejantes a las *criptoendolíticas* (constituidas por organismos de suelos profundos) halladas en la Tierra. Y también cabe que la vida resista en lagos subterráneos. Precisamente se estudia aquí, en el «tercer planeta», la vida de ambientes que se asemejan en algunos aspectos a los del «cuarto»: la del río Tinto (Huelva, España), la del desierto de Atacama (Chile) y la de la Antártida.

Las pretensiones de que aún hay vida en el frío Marte provienen sobre todo de dos fuentes: los datos obtenidos por las sondas Viking y los referidos al metano atmosférico.

Las misiones Viking

Los aterrizajes en Marte, en 1976, de los módulos Viking Lander 1 y 2, fueron éxitos extraordinarios de la NASA. Tras fotografiar el anaranjado paisaje marciano, los Viking tenían como misión realizar cuatro tipos de experimentos, que se efectuaron sin contratiempos. En primer lugar se analizó la composición del suelo marciano. Hasta el límite de lo detectable, no se encontró ninguna materia orgánica. Fue una sorpresa, pues se pensó que al menos habría alguna procedente de objetos espaciales, como las condritas carbonáceas (meteoritos rocosos con cierta abundancia de compuestos de carbono).

En cambio, los experimentos biológicos en los que se buscaba un metabolismo degradativo o biosintético dieron, asombrosa-

mente, resultados parcialmente positivos. En particular, el ensayo en el que al añadir a suelo marciano nutrientes marcados con ^{14}C (radiocarbono) se obtuvo $^{14}\text{CO}_2$ (dióxido de carbono 14). El diseñador del experimento, el ingeniero estadounidense Gilbert V. Levin (n. 1925), sigue convencido de que el resultado se debió a cierta actividad biológica sensible a la temperatura.

Sin embargo, la conclusión oficial de la NASA fue que no se detectó presencia de vida. En palabras del responsable de los experimentos biológicos, Harold P. Klein (1921-2001), «...todos los datos, en su conjunto, sugieren una interpretación no biológica, inorgánica, de todas las reacciones observadas». La aparente ausencia de compuestos orgánicos sugería un mecanismo que los destruye en la superficie marciana: esencialmente, radiación UV y oxidación, tal vez por agua oxigenada (H_2O_2). Pero hoy está claro que el diseño experimental no fue el más adecuado. Recientemente se ha comprobado que la materia orgánica que hubiera en el suelo marciano se destruiría, en el mismo proceso de análisis, por las sales llamadas percloratos (ClO_4^-) que la sonda Phoenix encontró en 2008 en el propio suelo: estos no la atacan significativamente a bajas temperaturas, pero sí la destruyen a las altas empleadas para los análisis (en los que, además, sí se detectaron los posibles productos de la destrucción).

Estos resultados obligan a reinterpretar los ambiguos y confusos datos de los Viking, y dan crédito a autores como Schulze-Makuch (Universidad de Washington) y Joop Houtkooper (Universidad de Giessen), quienes argumentan que el conjunto de resultados se explica mejor biológicamente que abióticamente, por lo que sostienen que en las muestras marcianas probablemente sí que había vida. Quizá fueran organismos con un interior rico en agua y agua oxigenada. Tanto esta como los percloratos servirían de anticongelante (igual que la sal común, que por eso se utiliza para licuar el hielo) y, por ser higroscópicos (capaces de absorber la humedad), ayudarían a captar la poca agua disponible en el ambiente.

Precisamente un amplio equipo internacional encabezado por el español Javier Martín-Torres (n. 1970), del Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra del CSIC, ha demostrado en 2015, con

FUTURAS MISIONES A MARTE

ExoMars es una misión robótica con un lanzamiento realizado en 2016 y otro previsto para 2020. Desarrollada por la ESA y la Agencia Federal Rusa del Espacio (Roscosmos), buscará biomarcadores pasados y presentes, incluido el metano, incluso a dos metros de profundidad del suelo. Además, también está el consorcio UPWARDS, que se define como «un proyecto de vanguardia para la comprensión global de Marte». Cuenta con la participación de siete instituciones científicas europeas, coordinadas por el Instituto de Astrofísica de Andalucía, que desarrollarán nuevas técnicas de análisis para explotar la misión Mars Express y la ExoMars. Pretende mejorar nuestra comprensión del ciclo marciano del agua, los flujos de metano y otros gases atmosféricos, y la composición del subsuelo marciano.

Otras misiones no tripuladas

Mientras tanto, la NASA desarrolla el vehículo explorador Mars 2020, que será lanzado ese año para intentar encontrar huellas de vida. Recogerá muestras que una misión posterior traerá a la Tierra para su análisis. Esta misión podría ser Red Dragon, una misión de bajo coste coordinada entre la NASA y la firma privada Space X, con posible lanzamiento en 2022. Por otro lado, la misión «rompehielos» Icebreaker Life quería penetrar en el subsuelo de las zonas polares en busca de vida y biomarcadores, pero finalmente se descartó; tal vez se recupere un proyecto similar, Exolance, una iniciativa privada.

¿Terrícolas en Marte?

También está el viejo sueño de enviar humanos a Marte. El viaje sería duro, de al menos tres meses en cada sentido, lo que supone transportar suficiente oxígeno, alimentos y agua. Como solo es sensato hacerlo cuando se alinean Marte y la Tierra, cosa que ocurre cada 26 meses, los astronautas deberían esperar casi dos años para regresar. El coste sería decenas

de veces superior al de una misión robótica, y el riesgo para la tripulación, evidente. Otro problema sería el de evitar la contaminación por organismos terrestres. Sin embargo, podría responder a las cuestiones acerca de la vida en Marte mejor que las misiones robóticas. Es muy probable que la decisión de llevar a cabo una misión de este calibre se sustente en consideraciones políticas más que científicas. Seguramente se realizará, pero después de 2030.



Visión artística del vehículo de exploración de la misión ExoMars en suelo marciano.

ayuda de los datos de la estación meteorológica del rover Curiosity, que los percloratos marcianos cada noche pueden absorber agua atmosférica y mantenerla líquida en los centímetros superiores del suelo marciano, formando salmueras; durante el día, el agua se evaporaría. Eso también explicaría los desprendimientos de material que se han observado en el planeta.

Es evidente que los experimentos Viking se diseñaron para detectar procesos metabólicos típicos de organismos de la Tierra, por lo que Sagan y Lederberg ya avanzaron que los resultados, si eran negativos, excluirían solo una subserie de las posibles clases de organismos marcianos. Además, solo se analizaron muestras de los 6 cm superiores del suelo, y los materiales orgánicos, o incluso seres vivos, embebidos en las rocas escaparían a la detección. Por descontado, los experimentos tampoco podían excluir que haya vida en otros lugares de la superficie.

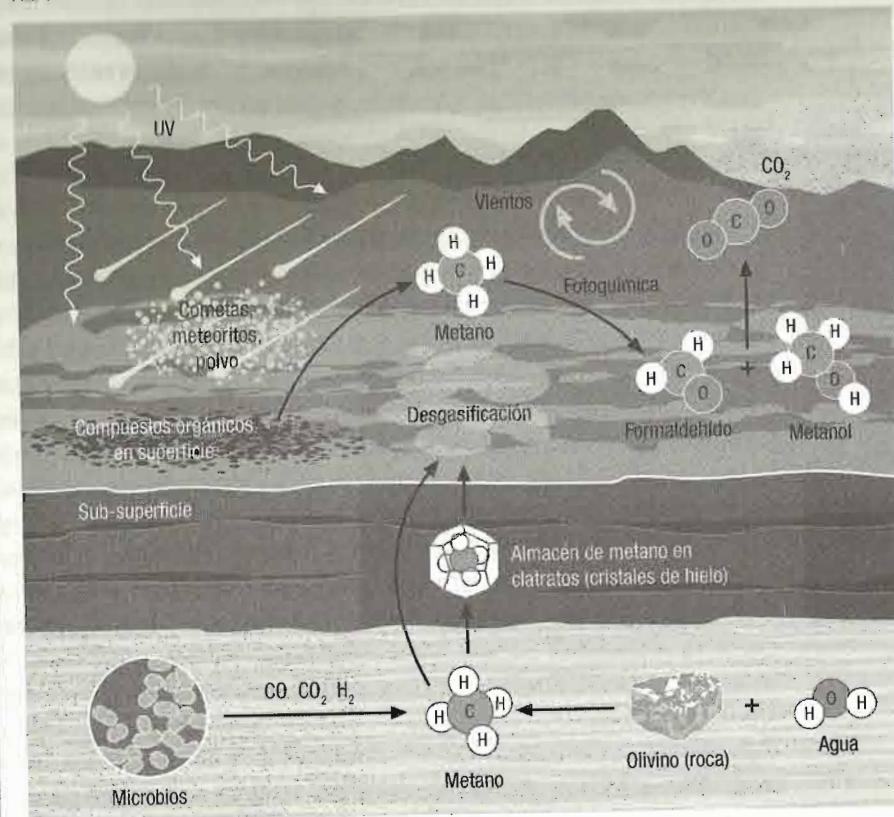
El enigma del metano de Marte

Es muy intrigante la detección de metano en la atmósfera marciana que realizó en 2004 la sonda Mars Express, pues en 2012 el vehículo todoterreno Curiosity no pudo encontrarlo, aunque en 2014 sí. El metano de Marte es, pues, una gran incógnita, y algunos científicos hablan con sorna de «creer» o no en su mera existencia. Hace falta explicar la causa de su variabilidad y, por tanto, su origen.

El metano marciano no debería durar más de unos siglos debido a las reacciones químicas que lo eliminarían, de modo que debe de haber una «fuente» de metano en Marte, y se especula que puede ser vulcanismo... o vida (figura 4).

Hay mucha expectación porque en la Tierra casi todo el metano es de origen biológico. Además, la cantidad de metano atmosférico parece variar en las distintas regiones de Marte y con las estaciones, lo que sugiere que sea producto de la acción de organismos metanógenos. Pero el vulcanismo también puede explicarlo: vías de escape desde el subsuelo que se abren más en verano que en invierno. Sin embargo, aunque la fuente sea vol-

FIG. 4



El ciclo del metano en Marte. El metano presente en el planeta rojo puede tener un origen geológico o biológico. En el segundo caso, se supone que procedería de comunidades microbianas.

cánica, tiene interés biológico, pues el calor (geotérmico) necesario para liberarlo probablemente sirva también para mantener agua líquida subterránea.

Algunos autores señalan que tiene especial interés medir la relación H_2 /metano; un cociente inferior a 40 indicaría con mucha probabilidad actividad biológica. Para realizar estas medidas y responder a más cuestiones, la próxima misión de la ESA a Mar-

te, ExoMars, llevará un detector, NOMAD, diseñado para detectar la más mínima traza de metano. Se estudiará de dónde sale, y dónde y cuándo se pierde. Se espera con cierta ansiedad que NOMAD aclare definitivamente el enigma del metano marciano.

VIDA EN CERES Y PLUTÓN

Entre Marte y Júpiter se encuentra el «cinturón de asteroides», que alberga millones de pequeños cuerpos rocosos. El mayor es Ceres, un planeta enano (subió de rango en 2006, igualándose con Plutón, que bajó) con unos 950 km de diámetro. En 2014, el Observatorio Espacial Herschel confirmó que Ceres contiene agua en abundancia, y que desde su tenue atmósfera expulsa al espacio hasta 6 kg de vapor por segundo. Desde marzo de 2015 lo orbita la sonda Dawn («Amanecer») de la NASA. Su superficie —plagada de cráteres— probablemente es una mezcla de agua helada y minerales hidratados como arcillas y carbonatos (que originan sugerentes manchas blancas), todo lo cual sugiere la existencia en el pasado de agua líquida. Tal vez hubo un océano muy salado entre una superficie helada y un núcleo rocoso, y se especula con la posibilidad de vida en surgencias hidrotermales. Pero que hoy se mantenga esa situación parece poco verosímil, pues es muy dudoso que a Ceres le quede suficiente calor interno. Para salir de dudas habrá que esperar nuevos datos, como los de la Agencia Espacial China, que ha sorprendido con su plan de enviar en la década de 2020 una sonda a Ceres que traería muestras a la Tierra.

En cuanto a Plutón, los datos de la reciente misión Nuevos Horizontes, de la NASA, sugieren un océano interno de agua que se mantendría líquida gracias al calor de la desintegración radiactiva. Además, Plutón tiene mucha agua helada y una tenue atmósfera muy rica en nitrógeno, pero que también contiene metano y monóxido de carbono. La incidencia de la radiación UV sobre estos ayuda a explicar que haya compuestos orgánicos de diversa complejidad, que incluso pueden caer junto al metano en forma de nieve. Pero parece muy poco probable que se pueda haber desarrollado vida.

VIDA EN JÚPITER Y SUS SATÉLITES

Júpiter se caracteriza por su gran masa y tamaño, y por su envoltura muy rica en hidrógeno y helio. Bajo ella puede haber un núcleo rocoso 10 veces más pesado que la Tierra; se espera que la sonda Juno que, enviada por la NASA, llegó a Júpiter en 2016, lo verifique. Pero no hay que hacerse ilusiones con la superficie de este núcleo, pues soportaría unos 20 000 °C y 500 millones de atmósferas. La temperatura externa de la atmósfera joviana cae, en cambio, hasta los -110 °C.

Entre ambos extremos hay una zona «templada» en la que Carl Sagan y otros propusieron la posible existencia de organismos, pero la intensa radiación, la escasez de agua y las condiciones generales no apoyan esa posibilidad. Los planetas gaseosos también se distinguen de los telúricos en que la forma dominante de C en sus atmósferas es el metano, en vez del CO₂. A veces se presentan como gigantescos laboratorios naturales de química prebiótica que producen, entre otros compuestos, acetileno, etano y HCN, mediante el uso como fuentes de energía de la luz y las descargas eléctricas, además del calor primordial liberado desde el interior. Aunque parece poco probable que esa química pueda ir mucho más allá, veremos qué sorpresas nos trae Juno.

Los cuatro satélites mayores de Júpiter (Io, Europa, Ganímedes y Calisto, de más cerca a más lejos) fueron descubiertos por Galileo (1564-1642) en 1610 (de ahí que se les llame satélites «galileanos»). Ganímedes es más grande que Mercurio, y Calisto no es mucho más pequeño. Io tiene impresionantes volcanes activos, pero nos importan más los otros tres, que tienen la superficie cubierta de hielo, carecen de atmósfera significativa y presentan densidades que indican que están formados básicamente de hielo y rocas. Lo más interesante es que hay pruebas de la existencia de océanos subsuperficiales de agua líquida en los tres.

¿Cómo es posible que tengan agua líquida con tan poca irradiación solar? La respuesta es la energía mareal, con alguna contribución de la geotérmica. Las fuerzas de marea en los satélites de un planeta gigante generan suficiente calor para mantener un océano de agua líquida bajo una capa de hielo. De hecho, son responsa-

bles del vulcanismo extremo en el cercano *Io*. En la acción real influyen, además, las resonancias orbitales entre los distintos satélites, que así mantienen órbitas no perfectamente circulares.

La ESA está desarrollando el Explorador de las Lunas Heladas de Júpiter (JUICE, de las siglas en inglés), con lanzamiento propuesto para 2022 y llegada en 2030. Estudiaría, además de Júpiter, sus lunas Europa, Ganímedes y Calisto por su interés astrobiológico.

Vida en Europa

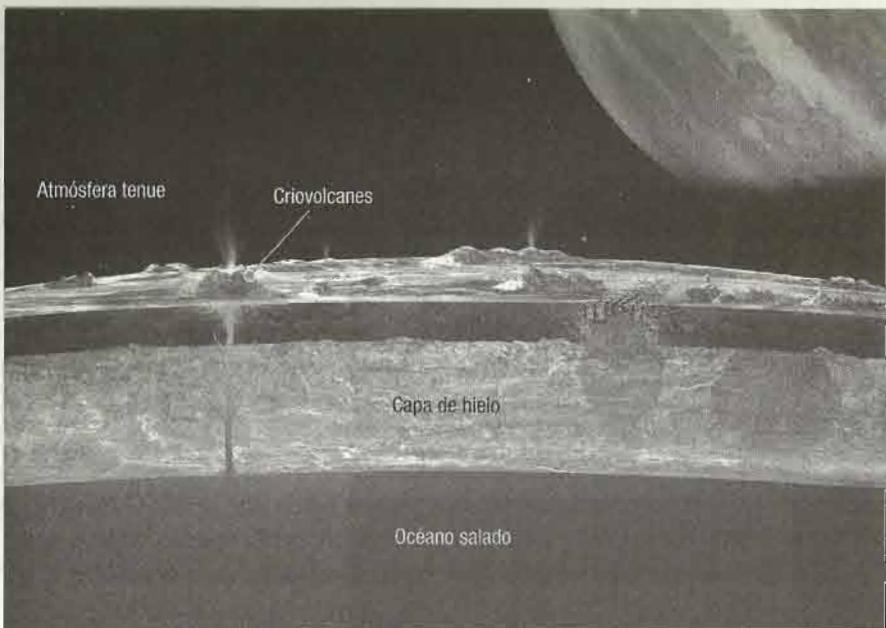
Europa presenta una superficie sorprendente, muy plana, helada, con multitud de grietas y pocos cráteres. Fue estudiado por las Voyager 1 y 2, y sobre todo durante ocho años (1995-2003) por la sonda Galileo.

Tiene una atmósfera muy tenue que contiene algo de O₂ probablemente procedente de la rotura de moléculas de agua por efecto de las radiaciones. La superficie, compuesta sobre todo de hielo de agua, está a unos -160 °C en el ecuador y -220 °C en los polos. Puede que ocasionalmente se activen criovolcanes (que no emiten roca fundida, sino materiales como agua, amoniaco, metano, etc., a baja temperatura).

La ausencia de relieve superficial relevante sugiere que el agua ha ascendido desde el interior y ha formado una capa de hielo, que tiene entre 10 y 30 km de espesor.

Puede incluso que en los comienzos del satélite hubiera agua líquida superficial. Pero donde es casi segura su presencia (según los datos de la Galileo) es debajo. Parece ser que la capa de hielo cubre un océano salado que puede llegar a tener el doble de masa que los océanos terrestres, y estaría implicado en el campo magnético del satélite (figura 5). En el fondo oceánico puede haber áreas de transferencia de materiales y calor análogas a las chimeneas termales de los océanos terrestres, aunque no llegarían a sostener una biomasa similar a la terrestre. Pero estudios recientes muestran que incluso sin actividad hidrotermal, el océano podría tener temperaturas, presiones y una química orgánica

FIG. 5



compatibles con la vida. Y en la corteza helada se han encontrado silicatos, presumiblemente procedentes del impacto de asteroides o cometas, que pudieron aportar materia orgánica. Por todo ello, Europa suele considerarse el cuerpo del sistema solar de mayor interés astrobiológico, junto con Marte.

Aunque la química prebiótica a bajas temperaturas tiene sus defensores, muchas reacciones de interés no parecen ser tan funcionales. No parece muy probable que se haya originado vida en Europa, pero estamos expectantes. Sí es más verosímil que las adaptaciones de ciertos organismos terrestres (como los que habitan en el lago subglacial Vostok, de la Antártida) les permitirían sobrevivir si se les introdujera en un océano «europeano».

Aprenderemos mucho sobre la habitabilidad de Europa mediante la citada misión JUICE y con la Misión de Sobrevuelos de Europa (del inglés, EMFM) de la NASA, cuyo lanzamiento se planea para 2022-2023, y en la que tal vez la ESA colabore con un «penetrador» del suelo (CLEP).

Vida en Ganímedes y Calisto

Ganímedes, el mayor satélite del sistema solar, tiene una temperatura en la superficie de unos -173°C . Dado que su densidad es $2/3$ de la de Europa, podría tener más agua incluso que esta. La sonda Galileo detectó en el año 2002

un campo magnético propio (único entre los satélites del sistema solar) que debe estar producido por el movimiento de una gran capa de agua líquida con una alta concentración de sales, y por un núcleo metálico.

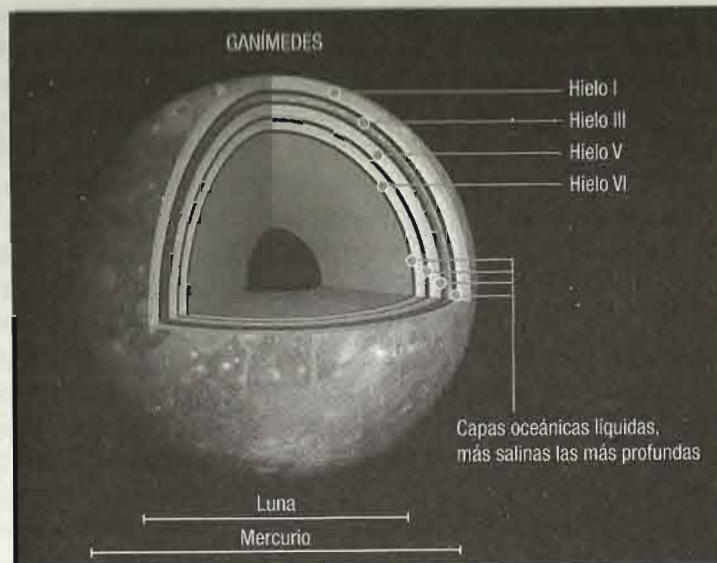
Del examen con el telescopio espacial Hubble de las auroras que produce ese campo se deduce que el océano ganímediano, con unos 100 km de profundidad, puede albergar más agua que la de los océanos terrestres. Inicialmente se pensaba que está situado entre dos capas heladas, pero ahora se habla de una estructura tipo «sándwich club» (con varias capas, figura 6), de tal modo que podría haber contacto directo entre el corazón rocoso y la capa más densa de agua salada, una interfase mucho más interesante para la vida que las de roca-hielo o hielo-agua. Hubble ha encontrado en Ganímedes, además —como en Europa—, algo de oxígeno en su tenue atmósfera, también procedente de la rotura de agua por la radiación incidente. La citada misión JUICE aportará más datos claves, pero habrá que esperar hasta 2030.

Calisto, por su parte, también puede tener un océano salado profundo, pero solo calentado por la radiactividad, pues su lejanía de Júpiter lo libra de las fuerzas de marea que actúan en

Un profundo océano bajo la corteza helada de Ganímedes abre posibilidades más interesantes para la vida fuera de la Tierra.

JOHN GRUNSFELD, DE LA DIRECCIÓN DE MISIONES CIENTÍFICAS DE LA NASA

FIG. 6



Estructura interna de Ganímedes. Las capas oceánicas podrían albergar más agua que el conjunto de los océanos de la Tierra.

Europa y Ganímedes. Esto, junto a la probable falta de contacto entre el agua líquida y el núcleo rocoso, lo hacen parecer poco habitable. Sin embargo, sí puede ser un buen lugar para establecer una base humana de exploración.

¿BIOPOSIBILIDADES EN LOS SATÉLITES DE SATURNO Y NEPTUNO?

El interés astrobiológico de algunos de estos satélites no es inferior al de los de Júpiter. Por ello merecieron, en el caso de los de Saturno, la atención de la NASA, la ESA y la Agencia Espacial Italiana a través de la misión Cassini-Huygens, lanzada en 1997, y con fin en septiembre de 2017.

El prometedor Encélado

La sexta mayor luna de Saturno se ve como una bola de 505 km de diámetro, blanca y helada, sujeta a intensas fuerzas de marea provocadas por Saturno y el satélite Dione. Estas fuerzas hacen que Encélado tenga al menos algunas condiciones para el desarrollo de vida, como probables océanos entre una capa de hielo y un núcleo rocoso, en los que el agua se calienta por energía mareal y actividad geotérmica.

Cassini encontró en 2005 enormes géiseres en el polo sur. Se trataba de 101 géiseres que se originan en cuatro grandes fracturas, a las que se conoce como «rayas de tigre» por su aspecto, y tienen unos 130 km de longitud, 2 km de anchura y 500 m de profundidad. Expulsan gases con agua, CO₂, CO y metano, junto con amoniaco, sales y sustancias orgánicas mal caracterizadas: un «cóctel» de interés probiótico. La temperatura —a veces superior a los 90 °C— y la presión de las emisiones indican que la fuente bajo la superficie es caliente y acuosa.

Todo esto, junto a los datos gravimétricos, apoya la existencia en el hemisferio sur de un océano interno de agua líquida salada. Puede ser un océano global sobre un núcleo rocoso de unos 370 km de diámetro, y bajo una corteza helada de unos 20 km de espesor promedio. Y en el fondo oceánico parece haber una actividad hidrotermal de gran interés biológico; interesa saber cuánto hidrógeno sale en los géiseres, indicativo de la actividad hidrotermal del océano subsuperficial. En resumen, hay agua, flujos de energía y materia, y compuestos orgánicos, requisitos básicos para la vida. ¿Podrían esas localizaciones sostener una vida semejante a la que se halla en la Tierra en torno a las fumarolas negras? En octubre de 2015 Cassini atravesó uno de los géiseres de Encélado a solo 49 km del suelo, y tomó muestras. Lamentablemente, la nave no iba equipada con instrumentos capaces de detectar vida.

Para algunos científicos, como Encélado es, al fin y al cabo, el único lugar fuera de la Tierra en el que se ha demostrado actividad hidrotermal, se ha convertido en el lugar más habitable del sistema solar después de la Tierra. Hay diversas propuestas para analizar a finales de la próxima década la habitabilidad del océa-

no interno, así como indicios de actividad biológica en muestras de las emisiones de los géiseres. Otras «lunas» de Saturno con posibles océanos subterráneos, pero de entrada menos habitables, son Mimas y Dione.

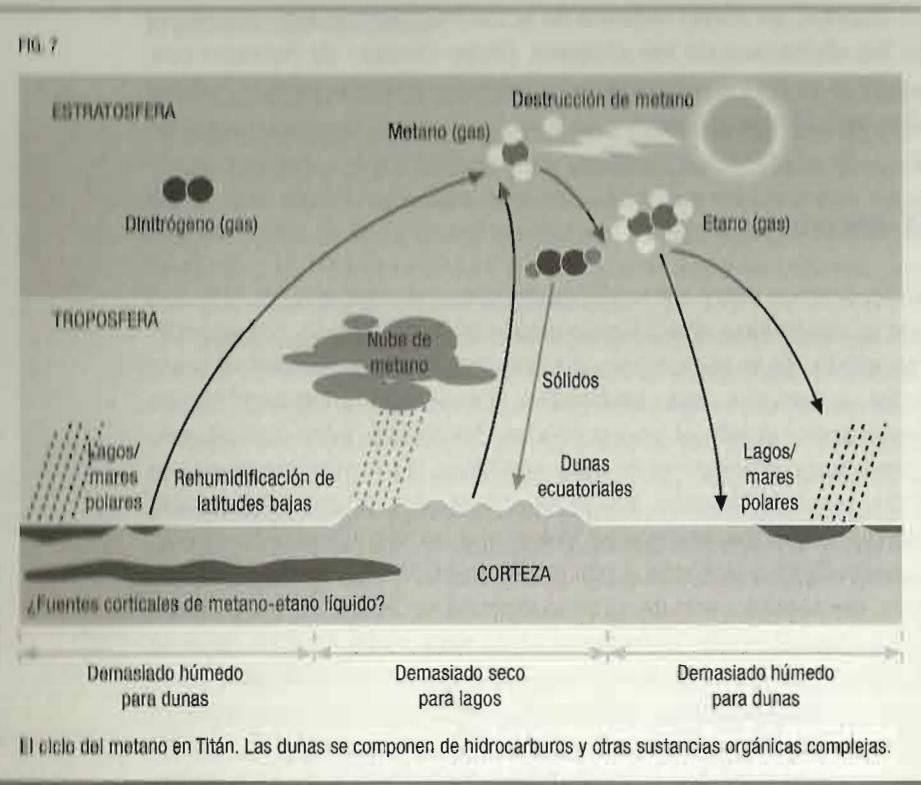
El «laboratorio» de Titán

Titán destaca entre los satélites del sistema solar por ser el único que contiene una atmósfera considerable, y además una superficie sólida. Es la mayor luna de Saturno y la segunda del sistema solar en tamaño, tras Ganímedes. Sobre todo, Titán también es prometedor desde el punto de vista biológico, pero con un ambiente muy diferente al de otros satélites. Hace muchos años que Titán resulta atractivo desde esta perspectiva, pero las expectativas aumentaron con los datos que aportó Cassini-Huygens. Cassini llegó a Saturno y sus satélites en 2004, y su sonda Huygens descendió poco después con éxito en Titán.

La atmósfera de Titán tiene en la superficie un 50% más de presión que la terrestre, y se compone de un 95% de nitrógeno, casi un 5% de metano, e hidrógeno y otros gases en mucha menor proporción. Hay nubes probablemente de metano, etano y otros compuestos orgánicos simples (como el cianuro de hidrógeno, HCN). Otros son más complejos y escasos, sobre todo los hidrocarburos aromáticos policíclicos formados en las capas altas, que pueden ser responsables del color anaranjado que se aprecia desde el espacio, y de la permanente niebla rojiza-anaranjada.

El ciclo del metano (figura 7) incluye lluvias que alimentan, junto con el etano y otros hidrocarburos más complejos, ríos, multitud de lagos y mares que se mantienen líquidos gracias a temperaturas en torno a -180 °C. Son las primeras masas líquidas superficiales descubiertas fuera de la Tierra. Destacan tres grandes mares en el hemisferio norte, en los que parece haber una «calma chicha» casi permanente. Y hay grandes dunas de materia orgánica, sobre todo en el ecuador.

Como fuentes de energía, en Titán destacan la luz UV, los electrones de la magnetosfera de Saturno y los rayos cósmicos. Para



algunos se asemeja a un gigantesco experimento Miller-Urey, pero en este había mucha más agua, como vapor y líquida. Además, las reacciones en la superficie de Titán serán lentas debido a las bajas temperaturas, aunque esto puede proteger a las moléculas termolábiles. A veces se afirma que las condiciones en Titán son muy similares a las que debieron darse en los primeros años de existencia de la Tierra, pero la temperatura y el agua, como mínimo, los diferencia radicalmente.

Curiosamente, la casi ausencia de agua líquida en la superficie de Titán lo marginaría, en principio, del primordial interés de la NASA, expresado en su divisa de «sigue el agua». Una vida en un medio de hidrocarburos sería, como ya hemos discutido, muy distinta a la que conocemos, tal vez con células basadas en com-

EL ENIGMA DEL METANO DE TITÁN

Una de las características más sorprendentes de Titán es su abundancia de metano. Según algunos modelos, como el metano se descompone al interactuar con la luz del Sol, en Titán no debería haberlo, a no ser que se trate de un compuesto liberado en grandes cantidades en el pasado, que se va agotando. Pero si se está reponiendo, ¿cuál es la fuente? La posibilidad más trivial es la actividad de criovolcanes que expulsarían agua, amoniaco y metano a bajas temperaturas, provenientes de un océano interno. Precisamente la escasez de cráteres en Titán hace pensar en una superficie joven y geológicamente activa.

¿Actividad biológica titánica?

La posibilidad más interesante para justificar esa abundancia de metano es, sin embargo, la actividad biológica. Se ha sugerido que podría haber vida en los lagos y mares de metano y etano líquidos. La actividad biológica también sería responsable de la desaparición de hidrógeno en la superficie. El anterior jefe de la NASA, el astrogeofísico Christopher McKay, propuso organismos que inhalan H_2 (en vez de O_2), lo metabolizan con acetileno (en vez de glucosa) y exhalan metano (en vez de CO_2). La química atmosférica encontrada es consistente con esta idea, pero no la demuestra. En todo caso, se piensa que la vida titánica se basaría en células que no estarían delimitadas por membranas lípidicas, sino constituidas de azotosomas, y serían de gran tamaño por la baja tensión superficial del metano. Los procesos metabólicos en torno a ~ 180 °C serían, además, lentísimos. La resolución de los enigmas de Titán vendrá de la mano de futuras misiones. En los últimos años se ha ido desechando una tras otra, pero esperamos que pronto acaben de fructificar ambiciosas ideas, como la de un submarino que analice los mares de metano/etano de Titán. Esto, junto con el estudio de la atmósfera, de la materia orgánica compleja de los grandes campos de dunas ecuatoriales, etc., debería acabar de aclararnos los ciclos geoquímicos titánicos y su eventual relación con la vida.



Mar de Ligeia (Titán): C_2H_2 (acetileno) + $3H_2$ \rightarrow $2CH_4$



Lago Superior (Tierra): $C_6H_{12}O_6$ (glucosa) + $6O_2$ \rightarrow $6CO_2$ + $6H_2O$

Possible metabolismo en Titán comparado con el terrestre. Las imágenes se muestran a escala.

puestos generadores de azotosomas. Pero no todo está perdido para la vida basada en el agua en Titán, pues cuenta con la emitida por criovolcanes, y los datos de la Cassini-Huygens mostraron que puede tener un océano subterráneo de agua y amoniaco líquidos, a una profundidad de unos 100 km.

Sería del mayor interés que una nave se posara en Titán y analizara *in situ* su atmósfera, lagos, mares y dunas. Lamentablemente, no hay planes concretos para hacerlo en los próximos años.

El neptuniano Tritón

Tritón es un satélite casi tan grande como la Luna, y parece un cuerpo «extraño» que fue atrapado por la gravedad de Neptuno, lo que explica que gire en torno a él al revés de lo esperado. Es geológicamente activo, y posee una atmósfera tenue.

Puede que en Tritón subsista, entre el núcleo y una cáscara de hielo superficial, un océano subsuperficial rico en amoniaco, nitrógeno líquido e hidrocarburos de bajo peso molecular como el metano. Hay una posibilidad, aunque sea remota, de que Tritón pueda alojar vida basada en el silicio, pues en ese océano podría haber silanos en concentraciones significativas. Otras condiciones parecen adecuadas: temperaturas muy bajas y ausencia de agua líquida y de especies reactivas de oxígeno. No obstante, se sugiere una abundancia relativa de diversos compuestos orgánicos que sería inconveniente para la biogenicidad de los silanos. La probabilidad de que exista vida en las profundidades del mar de Tritón se antoja mucho menor que la de Europa, pero no podemos descartarla.

En la tabla de la página siguiente se ofrece un resumen de los lugares más habitables del sistema solar.

PANSPERMIA EN EL SISTEMA SOLAR

Para un planeta o satélite parece mucho más fácil sostener la vida que generarla. Por eso es posible que algunos lleguen a habitarse por la importación de seres vivos desde otros cuerpos celestes.

Lugares bioamigables del sistema solar

Cuerpo	Tipo de cuerpo	Dist. Sol	Dónde puede sostener vida	IST	IHP
Venus	Planeta	0,72	Nubes ácidas	0,44	0,37
Marte	Planeta	1,5	Subsuelo. Posibles bolsas subterráneas de agua líquida	0,70	0,56
Tierra	Planeta	1,0	Aire, superficie, agua, subsuelo	1,00	0,96
Ceres	Planeta enano	2,8	Poco probable océano subterráneo acuoso	0,27	0,23
Europa, Ganimedes, Calisto	Grandes satélites de Júpiter	5,2	Probable océano subsuperficial acuoso	0,26 0,29 0,34	0,47 — —
Encélado	Satélite de Saturno	9,8	Muy probable océano o mares subterráneos acuosos	0,10	0,35
Titán	El mayor satélite de Saturno	9,8	Lagos de metano y etano, con otras moléculas orgánicas Posible océano subterráneo de agua, amoniaco...	0,24	0,64
Tritón	El mayor satélite de Neptuno	30,1	Posible océano subterráneo rico en amoniaco	0,07	0,23
Plutón	Planeta enano	39,3	Posible océano subterráneo acuoso	0,08	0,22

Dist. Sol: distancia media al Sol en UA. IST: Índice de similitud con la Tierra. IHP: Índice de habitabilidad planetaria.

Una panspermia «no intencionada» puede suceder tras el impacto de un asteroide o cometa contra un planeta o satélite habitado por seres vivos. Puede que algunos de ellos sobrevivan, salgan disparados entre los materiales eyectados, resistan el trayecto y tras caer en el otro cuerpo, se reproduzcan con éxito. Hay quienes defienden que esa suma de azares pudo traer la vida a la Tierra procedente, por ejemplo, de Marte. Por eso, si se encontrara que hay o ha habido seres vivos en Marte, sería del mayor interés evaluar un posible origen común con la vida terrestre, que indicaría la existencia de panspermia en un sentido, o en el otro, o incluso que llegó a ambos planetas una misma forma de vida.

De igual modo, podría haber habido contaminación cruzada entre otros diversos cuerpos del sistema solar (suponiendo que

TERRAFORMACIÓN Y COLONIZACIÓN DE MARTE

Marte, si no posee vida, al menos parece un planeta «biocompatible». Además, se plantea que sus parámetros astrofísicos permitirían el mantenimiento de una atmósfera tan rica en CO₂ como ahora, pero mucho más densa y templada. Aunque hoy es muy frío (con una temperatura media de -60 °C en la superficie), oxidante y seco, muchos creen que se le puede calentar y forzar para que posea cantidades suficientes de los materiales necesarios —en particular agua— para que mantenga vida importada de la Tierra, incluso humana. Se trataría de asomar Marte a la Tierra, o terraformarlo para obtener recursos o derivar población. Terraformar Marte requeriría tres grandes cambios interrelacionados: construir una atmósfera densa, calentarla y retenerla. El plan para lograrlo e implantar vida terrestre en Marte incluiría cuatro fases principales, y, al menos en parte, tal vez se trate de «restaurar» el Marte de hace más de 3000 Ma.

Paso previo: exploración

La primera consistiría en una exploración robótica y humana. La primera misión tripulada podría viajar en la década de 2030, y el establecimiento de un asentamiento autosuficiente está siendo considerado con seriedad. Se habla de *paraterraformación* o *pseudoterraformación*, y de construir una «casa-mundo»: un recinto habitable con atmósfera respirable, bajo una cubierta transparente.

Objetivo: calentamiento

En la segunda se iniciaría la «ingeniería planetaria» para calentar el planeta más de 60 °C. Se enriquecería la atmósfera en CO₂ y la superficie en agua líquida. Todo ello está interrelacionado, y supone descongelar al menos en buena medida los casquitos polares, liberando su agua y CO₂, hoy helados, pero también los presentes en el suelo del resto del planeta. Los atrapados en forma de carbonatos serían más difíciles de liberar. ¿Cómo conseguir el calentamiento? Se ha propuesto añadir a la atmósfera grandes cantidades de gases de efecto invernadero potentes —como los clorofluorocarbonados—, hacer impactar cometas contra Marte, emplear espejos espaciales gigantes que enfoquen luz solar sobre los casquitos, o cubrir estos con hollín o plástico. El calentamiento liberaría CO₂ y H₂O que aumentaría aún más la temperatura, estableciéndose un ciclo de realimentación positivo.

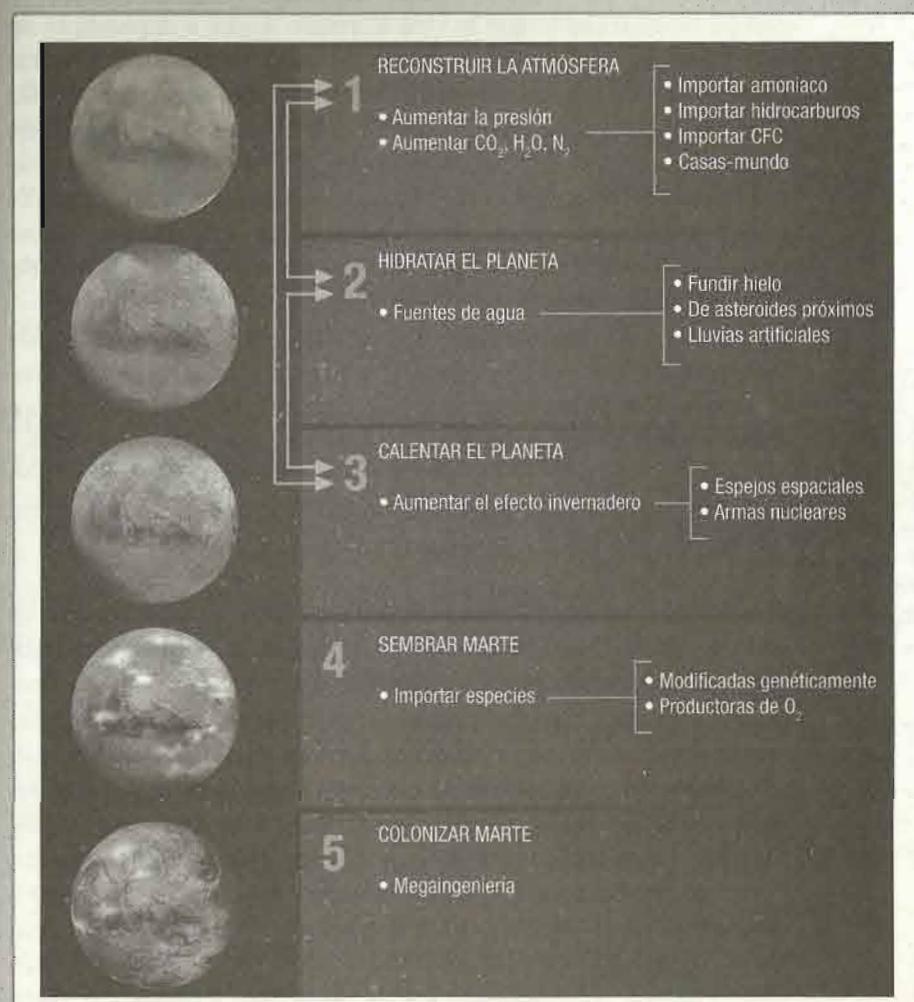
Implantación de vida

En la tercera fase, si es que no emergen organismos indígenas de Marte, se activaría un programa de Ingeniería biológica para implantar comunidades microbianas en un ambiente anaerobio. El proceso de establecer un ecosistema, o biosfera, en un planeta estéril se conoce como *ecopalestis* o *ecosíntesis planetaria*.

Generación de atmósfera

La cuarta fase conduciría a una atmósfera rica en O₂ (y N₂). Sería la más larga, se habla de decenas o centenares de miles de años, y la tarea recaería sobre todo en la propia vida ya instaurada, en organismos con fotosíntesis productora de O₂. Ya con O₂ en la atmósfera, se llevarían invertebrados, insectos («no mosquitos, por favor», dice McKay), etc. En todo caso, sería preciso una tarea

de mantenimiento para evitar que Marte volviera a perder la atmósfera y a enfriarse y desecarse. Para algunos, la tarea es imposible, sobre todo porque la ausencia de un escudo magnético frente al viento solar y de suficiente masa para retener la atmósfera conducirían a la pertinaz pérdida de toda la que se genere. Al margen de si es científicamente posible y técnicamente asequible todo lo anterior, existe también un debate ético: ¿Terraformar otros mundos es algo moralmente correcto?



La Vía Láctea es un lugar empapado.

PAUL HERTZ DIRECTOR DEL DEPARTAMENTO DE ASTROFÍSICA DE LA NASA

alguno estuviera habitado). Nada de esto es imposible, aunque parezca improbable. En el caso de la Tierra, es mucho más verosímil un origen indígena de la vida.

Sin embargo, en la actualidad sí que se ve muy viable que la vida terrestre llegue a expandirse de diversas formas fuera de la Tierra. Ya comentamos que Francis Crick defendió que la vida en la Tierra pudo ser sembrada en ella deliberadamente por una civilización alienígena. Esta panspermia «intencionada», o dirigida, alejaba en el tiempo y en el espacio el problema del origen aquí, y nos «separaba» de la solución. Ya pocos respaldan esa idea, pero, curiosamente, hoy estamos, como hemos visto, en condiciones de ser nosotros los «sembradores de vida» en otros lugares del sistema solar —los más habitables—. No parece difícil que diversos organismos terrestres, en particular los llamados *extremófilos*, puedan medrar, no solo en Marte, sino en diversos satélites (sobre todo Europa, Ganímedes, Encélado y Titán) y tal vez incluso en planetas enanos como Ceres y Plutón.

Protección planetaria

Podrían necesitarse incluso medidas especiales para no «contaminar» involuntariamente de vida terrestre esos cuerpos al explotarlos, ocasionando una «panspermia negligente». Con esta conciencia, diversos Estados involucrados en la exploración espacial suscribieron el 10 de octubre de 1967 el «Tratado del Espacio Ultraterrestre», que representa el marco jurídico básico del derecho internacional del espacio. En 2016 ya lo han suscrito 103 Estados. Contempla asuntos de paz y seguridad internacionales, pero también busca evitar que la vida terrestre contamine involuntariamente otros cuerpos del sistema solar. Y al revés, que sea la Tierra la contaminada con vida extraterrestre. Mientras que esto último parece enormemente improbable, pues ni siquiera hemos hallado la posible vida contaminante, lo primero es muy factible, y hasta podría haber sucedido ya.

CAPÍTULO 5

Búsqueda de vida más allá del sistema solar

Unos creen que estamos solos, mientras que para otros hay infinidad de planetas habitados fuera del sistema solar. La única manera de solucionar la controversia es buscar los lugares más hospitalarios para la vida, e incluso indicios, o, a ser posible, señales inequívocas de su existencia.

La detección de planetas fuera del sistema solar —los exoplanetas— no es fácil a causa de su gran lejanía. Menos aún, claro está, la de «exosatélites».

Cada vez se avanza más en la «detección directa» de planetas, es decir, la captación de su imagen o de su espectro lumínoso. De hecho, es lo ideal de cara a nuestro interés en encontrar vida o calibrar habitabilidad, pero es muy difícil debido al pequeño tamaño, masa y brillo de los planetas respecto a sus estrellas.

Para el mero descubrimiento de exoplanetas, hasta el momento resulta mucho más fácil y fructífera la detección «indirecta». Consiste en determinar la modificación que un planeta causa en ciertas propiedades o comportamientos de la estrella sobre la que gira, como la posición y el brillo. Hay cuatro métodos de detección indirecta, basados en astrometría, velocidad radial, tránsitos y microlentes gravitacionales.

Los dos primeros se basan en que la estrella y el planeta giran en torno al centro de masas común. Este sería equidistante a ambos si tuvieran la misma masa, pero como la de la estrella es muy superior, el centro está mucho más cerca de ella, incluso en

su interior. La órbita de la estrella en torno al centro de masas es por tanto poco acusada, apenas un bamboleo.

La astrometría mide el bamboleo observable mediante telescopios (figura 1), mejor si los planetas son grandes y lejanos, como ocurre en nuestro sistema solar. Pero dada la duración de las órbitas (por ejemplo, unos 12 años en el caso de Júpiter, 29 en el de Saturno), a veces hay que esperar años o incluso décadas para detectarlos.

El método de velocidad radial mide las variaciones en la velocidad de la estrella debidas al efecto de un exoplaneta que la orbita. Cuando la estrella se nos acerca, las líneas de su espectro se desplazan al azul, mientras que cuando se aleja se mueven hacia el rojo (es el mismo *efecto Doppler* por el que cuando un coche con sirena se nos acerca el sonido se hace más agudo, y más grave cuando se aleja) (figura 2). La frecuencia del cambio nos dice el periodo orbital del planeta.

Naturalmente, la mejor detección se produce cuando la órbita está en el mismo plano que la línea que une la estrella con nosotros, pues si la órbita es perpendicular a esa línea no habría alejamientos y acercamientos.

Este método produce un sesgo a favor de la detección de planetas masivos en órbitas cortas y próximas a sus estrellas (los llamados «júpiteres calientes»), por la mayor influencia gravitacional del planeta sobre la estrella. Fue el método de mayor éxito hasta 2012, pero sigue empleándose con instrumentos como el hispano-alemán CARMENES, que trabaja con estrellas más pequeñas y frías que el Sol.

El método de las microlentes gravitacionales (figura 3) se basa en que, obedeciendo la relatividad general de Einstein, cuando una estrella se sitúa entre la Tierra y otra estrella más lejana, hace de *lente gravitacional*, y los rayos de la estrella lejana se desvían ligeramente produciendo un débil aumento de su brillo. Si la estrella próxima tiene un planeta, contribuye a la desviación de los rayos.

Con este método se puede estimar la masa del planeta y su distancia a la estrella. En los poco frecuentes casos en los que se consigue aplicar, permite detectar planetas más pequeños y

FIG. 1

La posición de una estrella «bambolea» un poco por el efecto de un planeta.

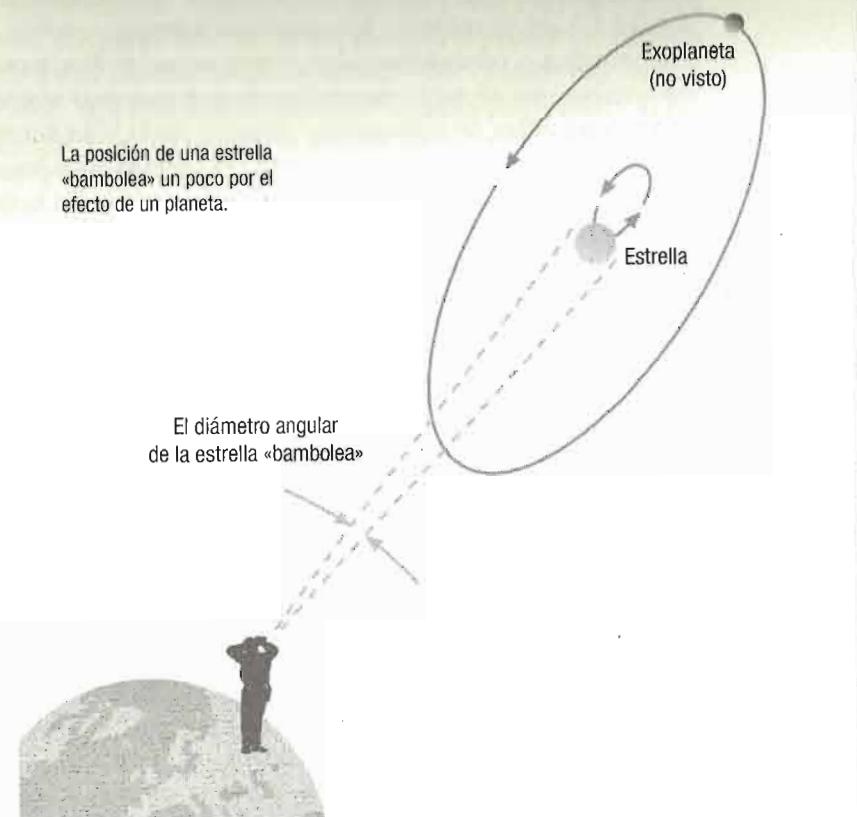
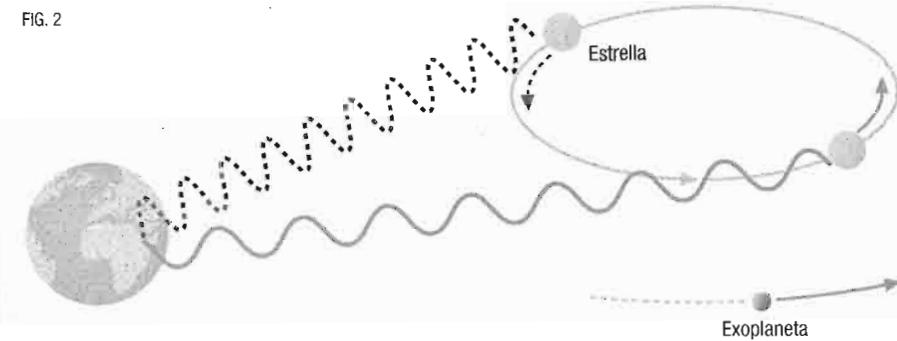


FIG. 2



Efecto Doppler debido al giro de una estrella en torno a un planeta.

más alejados de su estrella. Por ejemplo, los de masa terrestre a 1,5-4 UA de su estrella. Los planetas salvajes —sobre todo si son grandes— también pueden actuar como lentes, y por tanto detectarse. Así se está comprobando que son muy abundantes, quizá haya miles de millones de planetas en la Vía Láctea.

El método de tránsito es el que en los últimos años ha permitido encontrar más exoplanetas. Mide el descenso del brillo de la estrella cuando un planeta, al orbitarla, pasa por delante de ella desde nuestro punto de vista (figura 4).

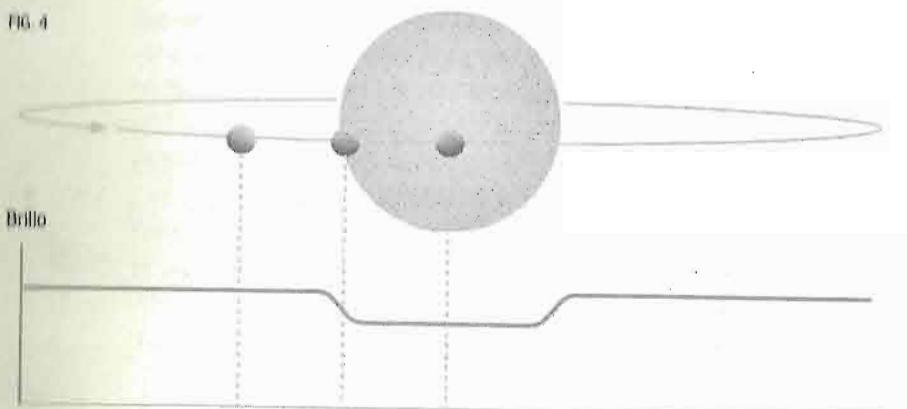
Claro que esto no ocurre siempre, depende del ángulo entre el plano orbital y la línea que nos une a la estrella, de manera que muchos planetas se nos escaparán. Estas perturbaciones se de-

FIG. 3



Efecto de un planeta sobre una microlente gravitacional.

FIG. 4



Efecto del tránsito de un planeta delante de una estrella sobre la luz que recibimos de esta.

tectan mejor cuando el planeta es grande y está muy próximo a la estrella. Mediante esta técnica se detectó el primer exoplaneta en torno a una estrella de tipo solar en 1995. Cuando hay suerte, el descenso de brillo nos informa del tamaño del planeta; el periodo orbital y la distancia a la estrella se calculan a partir de la frecuencia del oscurecimiento.

Ha sido el método empleado por la misión COROT (que, liderada por la Agencia Espacial Francesa, obtuvo datos entre 2006 y 2012) y, sobre todo, por la muy exitosa misión Kepler de la NASA, un telescopio espacial «cazoplanetas» que empezó a funcionar en 2009 y, tras una avería en 2013, se consiguió reactivar en 2014 (misión K2) con gran resultado. Estudia continuamente los posibles tránsitos en unas 150 000 estrellas situadas a 500-3 000 años-luz en una zona del cielo entre las constelaciones del Cisne, Lira y Draco, que supone aproximadamente 1/400 del cielo total (véase la imagen de la pág. 137).

EXOPLANETAS CONOCIDOS

El satélite Kepler ha encontrado, mediante el método de tránsito, casi 5 000 candidatos a exoplanetas, más de 2 300 de los cuales se han confirmado, a menudo mediante otras técnicas. De ellos, nada menos que 1 284 se incorporaron, a la vez, en mayo de 2016, incluyendo nueve probablemente rocosos en zonas habitables. El total de planetas confirmados en esta fecha supera los 3 300. Como mínimo el 20% (cabe esperar que sea mucho más) forma parte de sistemas planetarios (varios planetas en torno a una misma estrella). En la figura 5 podemos observar el gran impacto de Kepler (y, por tanto, del método de tránsito) en el hallazgo de nuevos exoplanetas.

Antes se suponía que el patrón de planetas del sistema solar, rocosos interiores y gigantes gaseosos exteriores (a más de 5 UA), sería común, pero los hallazgos iniciales no concordaban con él. La mayoría de los exoplanetas eran gigantes gaseosos, y sobre todo muy próximos a su estrella, incluso mucho más que lo que está Mercurio del Sol. Deben tener altas temperaturas en su su-

Número de planetas nuevos

FIG. 5

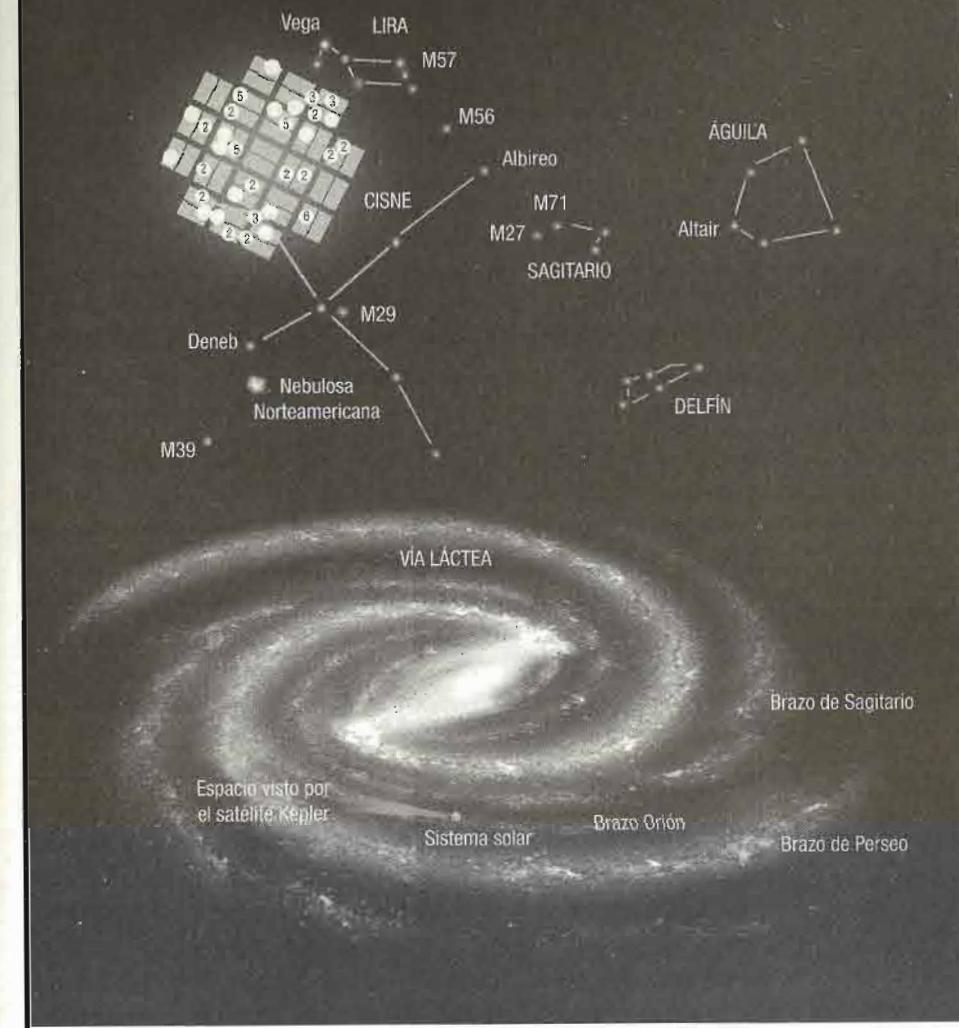


Exoplanetas descubiertos cada año. Solo se incluyen los confirmados, pero hay más «candidatos». Los descubrimientos de la misión Kepler/K2 se basaron en el método de tránsito. Los «no keplerianos» incluyen este método y otros.

perficie, de ahí que se les llame júpiteres calientes. Sus períodos orbitales son muy cortos, típicamente de menos de 10 días. Pero eso no quiere decir que la mayoría de los planetas sean así, sino que eran los más fáciles de detectar con las técnicas usadas hasta entonces.

Hoy se piensa que los júpiteres calientes fueron antes gigantes gaseosos mucho más alejados de su estrella, pero que migraron hasta sus proximidades. Puede que Júpiter no lo hiciera por el efecto de Saturno (al que, en ese caso, podríamos deberle la vida), pero, en un futuro lejano, cuando el Sol se convierta en una gigante roja, tal vez sí se convierta finalmente en un júpiter ca-

CAMPO DE VISIÓN DE LA MISIÓN ESPACIAL KEPLER



La parte superior de la imagen muestra la región del cielo estudiada por la misión Kepler de la NASA. Los puntos blancos indican planetas de especial interés; cuando hay varios muy próximos se indica el número. Dicha región se detalla, en la parte inferior de la imagen, en el conjunto del contexto galáctico.

liente. Conforme avanzan las técnicas de detección, comprobamos que los júpiteres calientes no son la norma, e incluso pueden ser relativamente raros. Pero tampoco parece frecuente el sistema solar; en realidad, todavía no sabemos qué tipo de sistema planetario es el más común.

Se calcula que, en promedio, cada estrella de la Vía Láctea tiene al menos un planeta, y se estima que los pequeños, rocosos, son más abundantes que los grandes. ¿Cuáles serán, en principio, habitables? Se pueden establecer diversos niveles de plausibilidad de vida, según hasta qué punto se satisfagan los requisitos para su aparición (fuentes de energía, compuestos orgánicos, medio líquido, atmósfera, estabilidad). El problema está en reunir esta información de cuerpos muy alejados.

HABITABILIDAD DE LOS EXOPLANETAS

En abril de 2014 se anunció el descubrimiento del primer planeta de tamaño terrestre en la zona habitable de su estrella: Kepler-186f, a casi 500 años-luz de la Tierra. Y, conforme las técnicas e instrumentos de detección mejoran, cada vez se van encontrando más tierras y supertierras en zonas habitables. Con las últimas halladas, ya tenemos 42, algunas tan cercanas como Wolf 1061c (Gliese 628c), a solo 14 años-luz.

Los gigantes gaseosos extrasolares también tienen interés respecto a las posibilidades de vida, pues es posible que, como los gigantes solares, tengan muchos satélites, algunos con ambientes habitables al modo de Europa, Titán, etc.

En cuanto a los júpiteres calientes, la probable migración que los acercó tanto a su estrella pudo ser catastrófica para la vida. Se piensa que si en sus sistemas había «tierras» o supertierras con vida, en muchos casos la migración la perjudicaría y tal vez acabaría con ella, pues el proceso expulsaría o destruiría los planetas pequeños que inicialmente estuviesen entre la estrella y el júpiter. Las lunas de los propios gigantes también sufrirían el efecto pernicioso de la migración. No obstante, según algunos modelos, muchos planetas habitables quedarían indemnes.

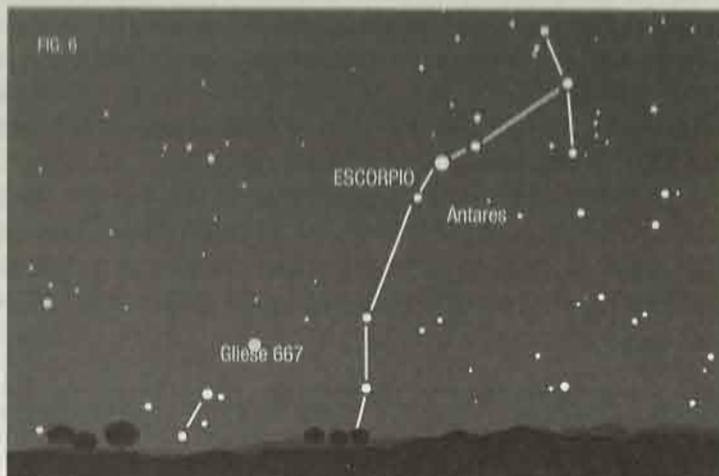
¿Cuál es la habitabilidad de los planetas conocidos? Para estimarla, a menudo se utiliza simplemente el Índice de Similitud con la Tierra (IST) del que ya hablamos en relación a los cuerpos del sistema solar. En la tabla de esta página vemos trece de los exoplanetas más destacados (todos en zonas habitables), según este índice y otros criterios.

Animamos al lector a consultar datos actualizados del «Archivo de exoplanetas de la NASA» y del «Catálogo de exoplanetas habitables de la Universidad de Puerto Rico en Arecibo». En este ya había, a mediados de 2016, 42 planetas habitables (13 tierras

Nombre	Estrella/planeta	IST	HITE	Dist. Pl-E (UA)	Flujo	Radio	Dist. E-Sol (años-luz)	Constelación
Tierra	G/T	1	0,829	1	1	1	0	—
Kepler-296e	M/T	0,85	0,814	0,17	1,41	1,5	737	Draco
GL 667 Cc	M/T	0,84	—	0,12	0,88	1,5	23	Escorpio
Kepler-442b	K/T	0,84	0,836	0,41	0,70	1,3	1115	Lira
Kepler-62e	K/ST	0,83	0,516	0,43	1,10	1,6	1200	Lira
Kepler-452b	G/ST	0,83	0,60	1,05	1,10	1,6	1402	Cisne
Kepler-1544b	K/ST	0,80	—	0,56	1,02	1,8	1138	Cisne
Kepler-283c	K/ST	0,79	0,178	0,34	0,90	1,8	1741	Cisne
Kepler-296f	M/ST	0,78	0,696	0,26	0,62	1,8	737	Draco
Wolf 1061c	M/T	0,76	—	0,08	0,60	1,6	14	Ofiuco
Kepler-1638b	G/ST	0,76	—	0,79	1,39	1,9	2866	Cisne
Kepler-1229b	M/T	0,73	—	0,29	0,35	1,4	769	Cisne
Kepler-62 f	K/T	0,67	0,664	0,72	0,39	1,4	1200	Lira
Kepler-186 f	M/T	0,61	0,40	0,43	0,29	1,2	492	Cisne

Trece de los exoplanetas habitables más similares a la Tierra, ordenados según el IST, en 2016. Se ofrece el índice de habitabilidad HITE cuando se dispone de él. Estrella/planeta: se indica el tipo estelar y si el planeta es una tierra (T) o supertierra (ST). Dist. Pl-E: distancia entre el planeta y su estrella. Flujo: flujo de radiación estelar, respecto al terrestre. Radio: en relación al terrestre. Dist. E-Sol: distancia entre la estrella y el Sol.

FIG. 6



Localización de la estrella Gliese 667, en la constelación de Escorpio.

y 29 supertierras), tres en torno a la enana roja Gliese 667 C, la menor de un sistema triple que a simple vista aparece como una estrella tenue en la cola de Escorpio (figura 6); en la tabla hemos destacado la candidata a *terra nova* Gliese (GL) 667 Cc (la «c» final indica que es el tercer planeta respecto a la estrella). Casi todos orbitan estrellas K y M, pero Kepler 452b y 1638b giran en torno a estrellas G, como el Sol.

Para hacer una lista con criterios lo más objetivos posible de cara a priorizar la búsqueda de vida en los exoplanetas mediante los instrumentos que se van a poner pronto en marcha, Rory Barnes y otros han desarrollado en 2015, desde la Universidad de Washington, un nuevo Índice de habitabilidad para planetas en tránsito (HITE, del inglés *Habitability Index for Transiting Exoplanets*). Este parámetro no se limita a considerar la zona habitable, sino que también pondera otros criterios para estimar la probabilidad de que un planeta pueda mantener agua líquida en su superficie. Esto lo diferencia del índice IHP que vimos en el capítulo 4, que buscaba eludir el «chovinismo» del agua y de la vida terrestre; con datos suficientes, conviene considerar las dos perspectivas.

En el HITE tiene mucho peso la excentricidad de la órbita y el albedo. Una alta excentricidad puede suponer períodos de excesivo acercamiento a la estrella (e influjo energético); un alto albedo, menor energía disponible en la superficie. El HITE no tiene en cuenta, en cambio, la presencia de ozono, magnetosfera, tectónica de placas, etc., sencillamente porque hoy no tenemos acceso a esa información de los exoplanetas.

Curiosamente, el HITE de algunos planetas es superior al de la propia Tierra (0,829). Entre los planetas confirmados destaca en este sentido Kepler-442b, con un HITE de 0,836. Como explican los autores, lo que ocurre es que los mejores candidatos tienen niveles de radiación incidente del 60-90% de la terrestre, que vienen a corresponderse con la mitad de la ZH. Recordemos que, por el contrario, la Tierra está muy cerca del límite interior de la ZH del sistema solar, por lo que tendría un HITE mayor si estuviera algo más alejada del Sol.

En la figura 7 vemos la relación entre el HITE y la luz recibida por los planetas detectados, incluyendo los no confirmados.

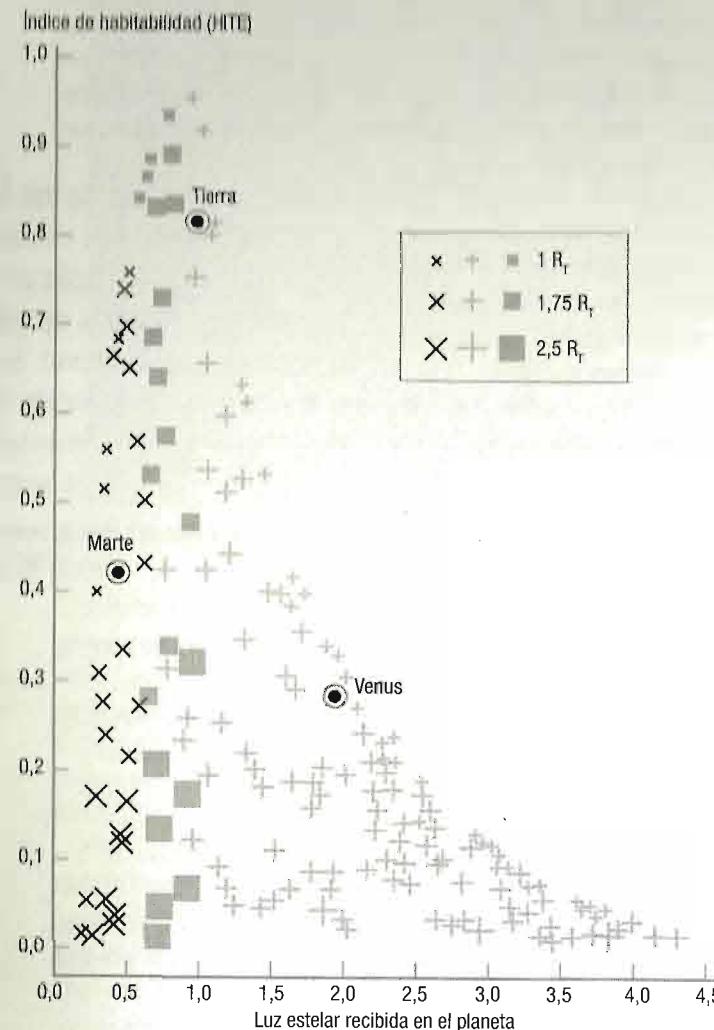
Nuestro Sol es uno de los 100 000 millones de estrellas en nuestra galaxia. Nuestra galaxia es una de las miles de millones de galaxias que pueblan el universo. Sería el colmo de la presunción pensar que somos los únicos seres vivos en esa enorme inmensidad.

WERNHER VON BRAUN, DISEÑADOR DE LOS COHETES V2 Y SATURNO 5

BIOMARCADORES PARA LOS EXOPLANETAS

Cuando se descubre un exoplaneta, los primeros datos que nos orientan sobre su habitabilidad son el tamaño, la masa, la distancia a la estrella, y el propio tipo estelar. Después, la excentricidad y el albedo. Pero estos datos, con todo el interés que tienen, se nos quedan cortos a la hora de pronosticar la presencia de vida de manera convincente.

El siguiente paso es, por tanto, detectar signos de su existencia. Desde la distancia, la mejor opción es analizar la química de la atmósfera planetaria por medio de su espectro. Este nos puede



Valores del HITE de los planetas en función de la intensidad de luz incidente desde su estrella. Las cruces (+) indican exceso de energía, las aspas (x) escasez, y los cuadrados (□) un influjo adecuado. El tamaño de los símbolos es proporcional al tamaño de los planetas (R_T : radio de la Tierra). Se indica la localización de Venus, la Tierra y Marte.

informar de la temperatura de la superficie del planeta y de su atmósfera, y también de la composición de esta. E incluso de la presencia de vegetación.

¿Qué composiciones atmosféricas son prueba inequívoca de la presencia de vida, es decir, biomarcadores o biofirmas? El objetivo ideal es no aceptar falsos positivos ni desechar falsos negativos, pero hay una gran controversia sobre cómo conseguirlo. Los falsos negativos parecen inevitables, pues es muy posible que haya formas de vida (por ejemplo, las localizadas en mares subsuperficiales) que no afecten de una manera muy ostensible a la atmósfera planetaria.

De entrada, interesan como biofirmas las composiciones gaseosas que estén varios órdenes de magnitud fuera del equilibrio termodinámico. Se necesita entonces que los gases no solo sean detectables, sino cuantificables, para lo que debe haber unos mínimos niveles a nivel planetario.

En la Tierra, el gas-firma dominante es el O_2 (y su producto fotolítico O_3), quizás seguido del N_2O/NO ; en la Tierra primitiva el principal delator de vida pudo ser el CH_4 . Otros biomarcadores propuestos para planetas con atmósferas como la terrestre incluyen el metanotiol (CH_3SH), el clorometano (CH_3Cl) y otros gases con azufre. Hay más gases producidos en abundancia por algunos seres vivos, como el CO_2 , pero también pueden tener un origen abiótico, por lo que por sí solos no nos dicen nada. ¿Y si se encuentra O_2 u otro gas de presunto origen biológico en otros planetas?

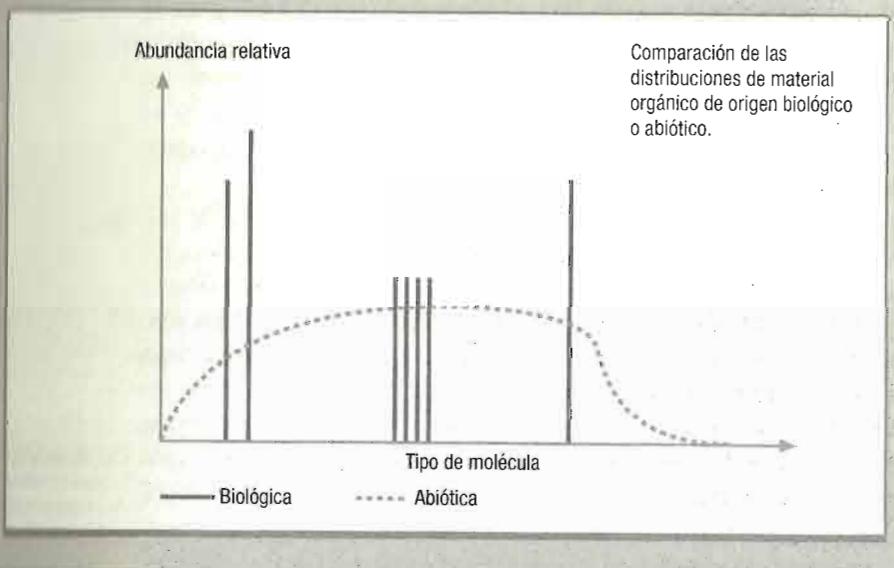
En todas las ocasiones, hay que descartar que se trate de falsos positivos. Por ejemplo, la fotodisociación del H_2O o del CO_2 puede liberar oxígeno diatómico o dioxígeno (O_2) hasta niveles detectables; el O_2 se puede acumular especialmente en un planeta seco y rico en CO_2 . De modo que la mera presencia en una atmósfera de O_2 a la vez que de abundante H_2O o CO_2 no significa actividad biológica. Es el caso del reciente hallazgo, por la sonda espacial Rosetta, de O_2 entre los gases del cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko. Se pensaba que no podría haber ahí O_2 , dada su reactividad, pero repárese que es el cuarto compuesto más abundante, tras el agua, el monóxido de carbono (CO) y el CO_2 .

OTROS BIOMARCADORES

Algunas investigaciones se plantean la detección de los productos de otras bioquímicas, o de metabolismos minoritarios terrestres que tengan más peso en otros lugares. En esta última línea, se han propuesto como gases firma el metanol, el clorometano y, en planetas sin O_2 , ciertos gases sulfurados. Para Sara Seager y colegas, en atmósferas dominadas por el hidrógeno, los indicadores de la presencia de vida serían el cloruro de metilo, el clometil sulfuro y el óxido nitroso. La propia Sara Seager ha propuesto la distinción entre gases firma de varios tipos. Los de tipo I (subproductos de reacciones metabólicas en las que se captura energía en reacciones de oxidación-reducción, tales como CH_4 , H_2S y N_2O) serían abundantes pero tendentes a dar falsos positivos. Los de tipo II son subproductos formados en la construcción de la biomasa, con consumo de energía; por ejemplo, dimetil sulfuro y clorometano. No darían apenas falsos positivos, pero, por su origen tan especializado, sus niveles serían demasiado bajos para ser detectados. Los de tipo III (producidos no con el fin de obtener energía ni para la construcción de componentes), muy especializados, se formarían en poca cantidad pero casi no darían falsos positivos.

Materia orgánica de distinta procedencia

Una posible clave para identificar el origen biológico de la materia orgánica, sea la que sea, la propuso Chris McKay: la de origen abiótico será mucho más diversa, lo que se ilustra por una curva en la figura. En la de origen biológico, en cambio, destacarán mucho «algunos» compuestos (piénsese en los L-aminoácidos), correspondientes a las líneas verticales de la figura.



Lo específico de la vida puede ser la existencia simultánea de niveles relativamente elevados, y en relaciones muy alejadas del equilibrio, de «varios» productos, como O_2 (muy oxidante) y metano (CH_4 , muy reducible). Lo malo es que en la práctica puede ser difícil cuantificar todos los gases necesarios para establecer la conclusión. Por ejemplo, en un planeta lejano idéntico a la Tierra identificaríamos bien el O_2 , pero tal vez no el metano. En cambio, este sí se apreciaría en una Tierra primitiva, en la que sería más abundante... pero entonces habría demasiado poco O_2 . Solo en una no muy larga etapa intermedia se detectarían bien los dos gases a la vez.

Una posibilidad realista es la presencia de un solo compuesto en niveles suficientemente altos. Por ejemplo, aunque es posible encontrar O_2 en un planeta sin vida, no parece que lo sea en niveles tan altos como en la Tierra. Pero estas predicciones se prestan más a falsos positivos que las conclusiones basadas en dos o más gases.

Cuando nos encontramos con datos reales, es probable que no nos den una certeza de vida, sino una cierta probabilidad, según hasta qué punto se puedan excluir las interpretaciones abióticas.

PROYECTOS DE «CAZA» DE PLANETAS HABITABLES

En el rastreo general de exoplanetas, ya se viene prestando especial atención a los que pudieran ser habitables, pero además se están desarrollando proyectos enfocados a encontrar específicamente estos últimos (a ser posible, certificando que, además de ser habitables, estén «habitados»).

Hay dos aproximaciones para estudiar las atmósferas planetarias con el objetivo de estimar la habitabilidad. La primera es mediante visualización y obtención de su espectro de manera directa. Lo mejor es el empleo de telescopios espaciales, para evitar la interferencia de la atmósfera terrestre. De hecho, en febrero de 2016

Estamos en un momento apasionante para saber cómo encajamos en el cosmos.

JILL TARTER, ASTROFÍSICA EXPERTA EN VIDA EXTRATERRESTRE

el Hubble consiguió por primera vez analizar la atmósfera de una supertierra, llamada 55 Cancri e, a 40 años-luz y con unos 2000 °C en la superficie por estar muy próxima a su estrella; no se detectó agua, pero parece rica en H₂ y helio, y los indicios de cianuro hacen pensar en lo que se llama un «mundo de diamante», muy rico en carbono y con abundancia de ese mineral en su interior.

La segunda consiste en la obtención (indirecta) de espectros de tránsito. Se trata de capturar el espectro de una estrella con y sin planeta por delante; la diferencia corresponderá al espectro planetario. Ya se han estudiado así decenas de atmósferas de júpiteres calientes. Ahora se trata de conseguirlo con las atmósferas de planetas rocosos tipo Tierra. Va mejor con los planetas de tamaño igual o superior a la Tierra en torno a estrellas M, por la menor interferencia de estas en las medidas. También, debido a la proximidad de los planetas a esas estrellas, los períodos orbitales más cortos hacen más frecuentes los tránsitos.

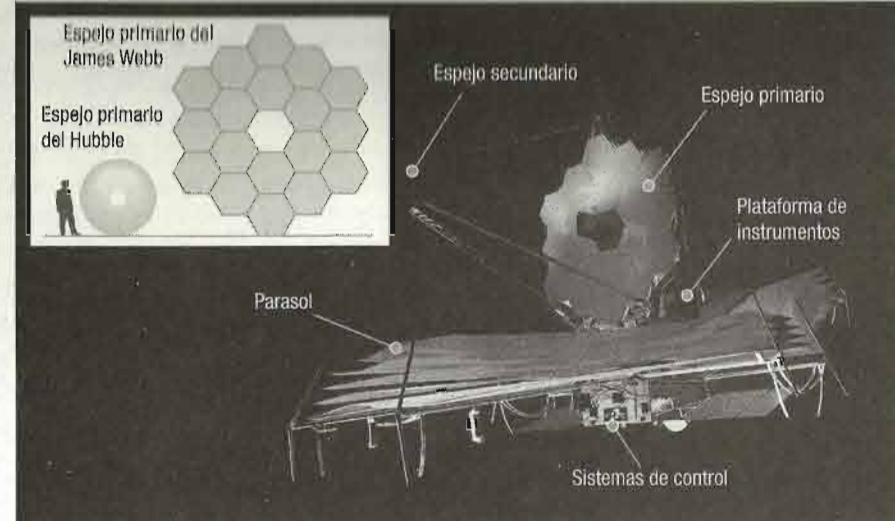
En los próximos años se pondrán en marcha nuevos telescopios que avanzarán en ambas estrategias. Además, se esperan buenos resultados de la espectroscopía de alta precisión (peines de frecuencias láser, espectropolarimetría, etcétera).

Los telescopios espaciales TESS, James Webb y WFIRST

El Satélite de Sondeo de Exoplanetas en Tránsito (TESS por sus siglas en inglés), de la NASA, es un telescopio espacial que desde 2017 estudiará los eventuales tránsitos en más de 200 000 estrellas «cercanas» de todas las regiones del cielo. Kepler, en cambio, solo analizó 1/400 del cielo, y sin preferencia por estrellas próximas. Pensando en la habitabilidad, TESS se concentrará en la detección de tierras y supertierras alrededor de estrellas de tipo F5 a M5, lo que incluye a las intermedias G (como el Sol) y K.

El telescopio espacial James Webb (figura 8) se lanzará en 2018 con la colaboración de la NASA, la ESA y la Agencia Espacial Canadiense. Se considera el gran sucesor del Hubble. Obtendrá imágenes directas de planetas y hará un análisis espectroscópico tanto directo como a través de tránsitos. Gracias a todo ello estudiará la

FIG. 8



El telescopio James Webb.

composición química de las atmósferas de planetas, en particular de los parecidos a la Tierra, en busca de biomarcadores.

El Telescopio Infrarrojo de Campo Amplio (WFIRST de su nombre inglés), de la NASA, es un telescopio espacial programado para 2025. Se espera que durante al menos seis años sea, entre otras cosas, un excelente «cazador de planetas» mediante detección directa y microlente gravitacional. WFIRST deberá ser capaz de encontrar miles de planetas, incluyendo distantes y pequeños, y hasta salvajes.

Hay que destacar que en abril de 2015 la NASA anunció una iniciativa interdisciplinar llamada Nexo para la ciencia del sistema de exoplanetas (NExSS, de su nombre inglés). Consiste en la creación en 2017 de un grupo con los mejores expertos en la búsqueda de vida extraterrestre, procedentes como mínimo de 12 instituciones científicas, sobre todo involucradas en los telescopios TESS, James Webb y WFIRST, y tal vez otros entre los que estaba habien-

LOS TELESCOPIOS NGTS, PLATO, E-ELT, FAST Y SKA

Todo indica que la búsqueda de nuevos planetas es una prioridad para muchas naciones. Numerosos acuerdos y colaboraciones llevadas a cabo a escala internacional permiten el establecimiento de telescopios cada vez más potentes en los lugares de observación más impresionantes del planeta.

Bajo el cielo chileno, el NGTS

Unos estudios ya en marcha y con un futuro prometedor son los de la Nueva Generación en el Búndeo de Tránsitos (NGTS por sus siglas en inglés), un conjunto de doce telescopios ubicados en el Observatorio Paranal de Chile, que, bajo los auspicios de varias universidades europeas, empezó a funcionar a principios de 2015. Seguirá el brillo de cientos de miles de estrellas de los cielos del sur. Se centrará en el estudio de supertierras y minineptunos, y podrá determinar sus masas y densidades, lo que nos orientará sobre su composición global (para empezar, si son rocosos o gaseosos). Lo más interesante es que podrá investigar mejor que hasta ahora las atmósferas de los exoplanetas en tránsito.

En busca de planetas habitables

La ESA tiene previsto poner en marcha en 2024 el conjunto de telescopios PLATO (acrónimo inglés de Tránsitos planetarios y oscilaciones estelares), un grupo de 34 telescopios de 12 cm sobre una misma plataforma, que permitirá localizar y caracterizar cientos de



El conjunto NGTS (*Next-Generation Transit Survey*) en Paranal, Chile.

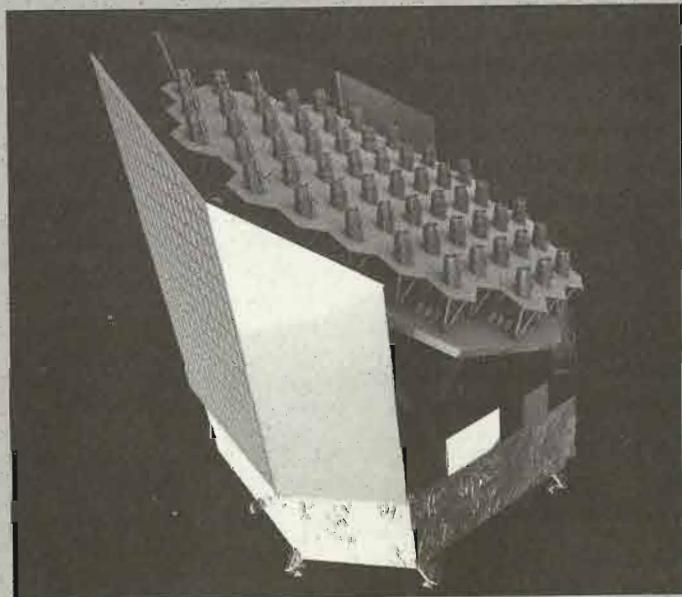
planetas habitables en las cercanías del sistema solar. Rastreará durante un mínimo de seis años la mitad del cielo y observará tránsitos en aproximadamente un millón de estrellas. Su sensibilidad permitirá estudiar planetas similares a la Tierra, y no solo estimará con buena precisión su tamaño, masa y edad, sino que incluso podrá detectar sus lunas y anillos.

Un trabajo de equipo

Los datos de la misión de la ESA Gaia, ayudarán a PLATO a medir con precisión miles de sistemas de exoplanetas. El catálogo de planetas habitables que obtenga PLATO será la base para posteriores medidas desde la Tierra con el fin de estudiar la composición química de sus atmósferas, utilizando el E-ELT (Telescopio Europeo Extremadamente Grande, del Observatorio Austral Europeo), que, ubicado en Chile, será, en 2024 el telescopio óptico y de infrarrojo más grande y sensible del mundo. Su información también se coordinará con la del James Webb.

Misiones de interés astrobiológico

Asimismo merece destacar que, a partir de ahora, será posible la detección de algunos exoplanetas con los nuevos radiotelescopios FAST (desde 2016) y SKA (desde 2020), de los que hablaremos más adelante. Con ellos será posible estudiar la radiación procedente de magnetosferas y auroras, cuando las haya, de planetas a cientos de años-luz de nosotros, e incluso detectar aminoácidos y otra materia orgánica de interés astrobiológico.



Recreación del conjunto de telescopios PLATO de la ESA. Su objetivo es descubrir y estudiar un gran número de sistemas planetarios en los alrededores del sistema solar. La misión priorizará el estudio de las propiedades de los planetas tipo Tierra en la zona de habitabilidad alrededor de sus soles.

do escasa comunicación. Se centrarán, de entrada, en la habitabilidad de los planetas, y luego, en la búsqueda de señales de vida.

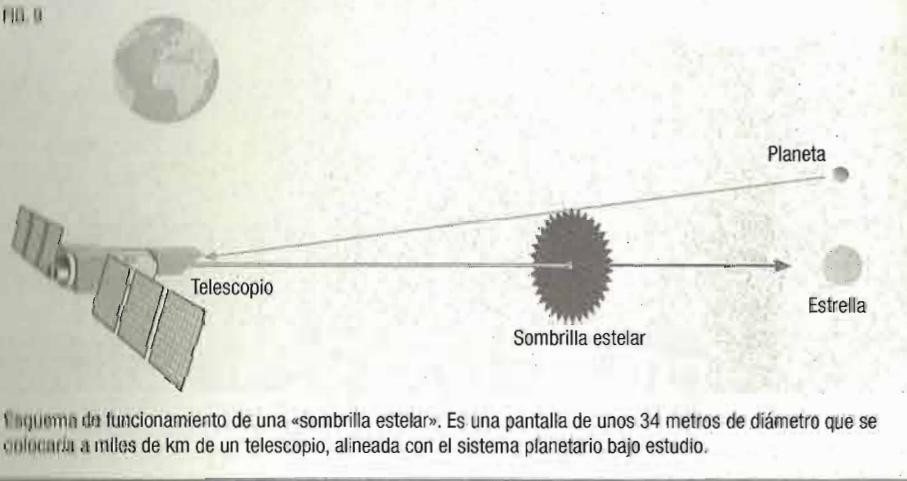
A MEDIO PLAZO: ATLAST Y LA «SOMBRILLA ESTELAR»

Aún no es seguro el nacimiento del telescopio ATLAST (por sus siglas en inglés, aunque también es un juego de palabras: *at last*, «al menos»), un observatorio espacial en fase de estudio por la NASA. Tendría un diámetro de 16,8 m (el del Hubble es de 2,4 m, y el del James Webb, de 6 m) y su sensibilidad sería 2000 veces mayor que la del Hubble. Se plantea como la mejor herramienta para (entre otras cosas) detectar vida en exoplanetas. Pero, si es que se aprueba, habrá que esperar hasta alrededor de 2030.

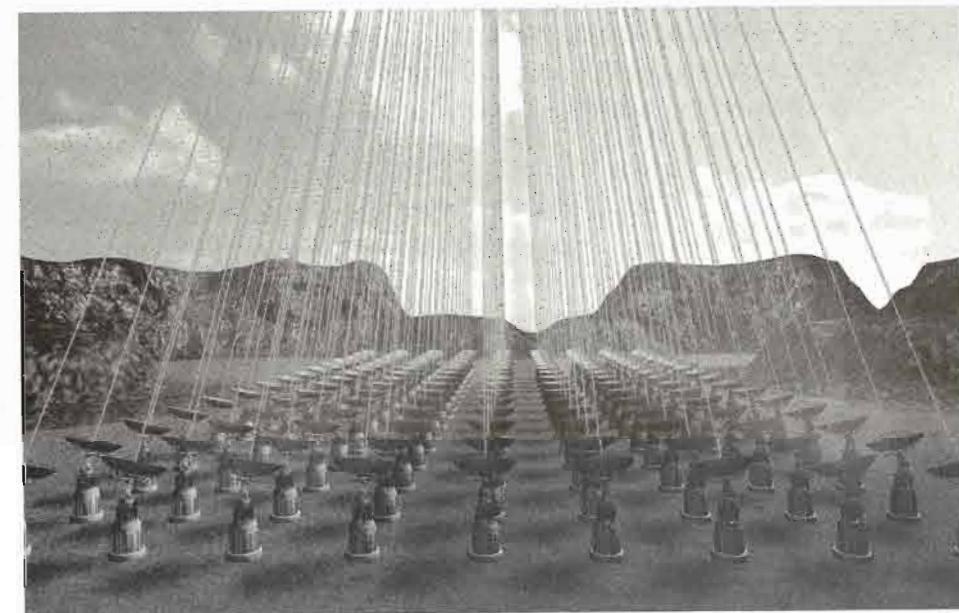
Confiamos en que antes se desarrolle la ingeniosa y menos costosa idea de la «sombrilla estelar» (*starshade*) (figura 9). Se trata de situar entre un telescopio espacial y el sistema planetario bajo estudio una «sombrilla» que tape la luz de la estrella para hacer mucho más visibles sus planetas.

Pero, sin duda alguna, la iniciativa más ambiciosa a medio plazo es la anunciada en abril de 2016 por el físico británico Stephen

FIG. 9



Esquema de funcionamiento de una «sombrilla estelar». Es una pantalla de unos 34 metros de diámetro que se colocaría a miles de km de un telescopio, alineada con el sistema planetario bajo estudio.



El espacio es objeto de las gestas exploradoras más rompedoras del siglo xxi. Lanzar miles de diminutas naves empujadas desde la Tierra mediante velas guiadas por láseres en un viaje interestelar hacia Alfa Centauri es quizás una de las más asombrosas. Tendremos que esperar aún veinte o treinta años para hacerla realidad.

El contacto con inteligencias lejanas

Hawking (n. 1942), *Breakthrough Starshot*, un innovador proyecto de «disparo a las estrellas» financiado con 100 millones de dólares por el millonario y físico ruso Yuri Milner (n. 1961) y dirigido por el astrofísico estadounidense Pete Worden (n. 1949), exdirector del Centro Ames de la NASA. Junto con otros científicos, pretenden desarrollar la tecnología necesaria para poder, dentro de dos o tres décadas, lanzar cientos o miles de nanonaves de unos pocos gramos y un tamaño inferior al de una tarjeta de crédito. Las naves serían impulsadas por velas y haces de luz disparados desde la Tierra (véanse las imágenes de la página anterior). Portarían cámaras, sensores, equipos de comunicación y otros instrumentos miniaturizados, en dirección a nuestro vecino estelar más próximo, Alfa Centauri, con el fin de estudiar sus planetas, sobre todo la posible existencia de vida en ellos.

Las naves se impulsarían «a vela», recogiendo una idea que se remonta al astrónomo alemán Johannes Kepler (1571-1630), que fue actualizada en la década de 1960 por Robert L. Forward y Philip Norem: se desplegarían en el espacio ligerísimas velas de pocos metros de lado, y recibirían durante unos minutos el empuje de potentísimos láseres hasta alcanzar 1/5 de la velocidad de la luz (unos 215 millones de kilómetros por hora), como se muestra en las imágenes de la página anterior. Como Alfa Centauri está a 4,3 años-luz, tardarían poco más de veinte años en llegar, aunque habría que esperar otros 4,3 años para recibir los datos de las nanonaves. El coste final del proyecto sería de varios miles de millones de dólares.

Hay que señalar que, según la información actual, los planetas potencialmente habitables más próximos no están en Alfa Centauri, sino en Wolf 1061, una enana roja situada a 13,8 años-luz de la Tierra, en la constelación de Ophiuco. Alrededor de ella orbitan al menos tres planetas. Cabe esperar que diversas nanonaves se dirijan hacia esta y otras estrellas próximas con planetas habitables, aunque, dados los tiempos necesarios, en estas ocasiones estaríamos ante iniciativas «intergeneracionales». En cualquier caso, es extraordinario que, por primera vez en la historia, nos enfrentemos a la posibilidad de cumplir el viejo sueño de llegar a las estrellas.

Cuando nos preguntamos si estamos solos en el universo, a menudo no pensamos únicamente en que haya vida ahí fuera, sino en alguien consciente con quien poder comunicarnos. Eso nos genera un sentimiento que se mueve entre el miedo y la esperanza. Al que cabe añadir la fascinación científica.

No tenemos el más mínimo indicio de la existencia de inteligencia extraterrestre, como tampoco de vida, pero el origen de esta se antoja muchísimo más fácil y, por tanto, probable. Si resulta que sí hay vida fuera de la Tierra, o incluso abunda, ¿hasta qué punto cabe esperar seres conscientes? En otras palabras, ¿será la inteligencia un rasgo evolutivo frecuente?, ¿podremos hablar no solo de «zonas de habitabilidad», sino de «zonas de conciencia», en las que las condiciones sean especialmente propicias para su desarrollo?

Hay multitud de ejemplos de convergencia evolutiva, y nos preguntamos si la inteligencia será un carácter convergente más. A favor de esta idea está su valor adaptativo, pues es una ventaja a la hora de reaccionar de manera adecuada frente a nuevos estímulos y situaciones. Sin embargo, en nuestro planeta, las formas de inteligencia «elevada» se restringen a los vertebrados. No parece pues un carácter obligado en la evolución de la vida. El biólogo evolutivo alemán Ernst Mayr (1904-2005) arguyó en 1993 que «solo una de las aproximadamente 50 000 millones de especies que han vivido sobre la Tierra ha sido capaz de generar civilizaciones». Y que entre una veintena de civilizaciones, solo

una ha desarrollado tecnología electrónica. Parece claro que, como nos mostró el paleontólogo estadounidense Stephen Jay Gould (1941-2002), la aparición de la especie humana dependió de una sucesión de contingencias (casualidades). ¿Es posible que con casualidades diferentes hubiera aparecido una especie con tecnología avanzada?

En la mayoría de los casos, la evolución de la inteligencia parece haberse detenido en cotas moderadas, indicando la existencia de diferentes niveles óptimos. Pero nos interesa en particular otra inteligencia como mínimo similar a la nuestra, capaz de desarrollar una tecnología gracias a la cual podamos comunicarnos a grandes distancias.

Por otro lado, sabemos dolorosamente que la alta tecnología acarrea problemas, pues posibilita la autodestrucción bélica y ecológica. Se cuestiona, por tanto, la estabilidad de la inteligencia capaz de desarrollarla. ¿Disminuirá las probabilidades de supervivencia a largo plazo?, ¿será normalmente un fenómeno inestable, y por tanto transitorio, en el universo?

Ciertos cálculos estiman que unos 50 millones de años es un tiempo suficiente para que una especie tecnológica pueda conquistar toda una galaxia. Y aunque las primeras generaciones de estrellas eran (por carecer de sistemas planetarios con elementos pesados) inadecuadas para la vida, se calcula que existen tierras y supertierras habitables desde hace al menos 9 000 Ma. En 1950, el premio Nobel de Física italiano Enrico Fermi (1901-1954), considerando que deben de existir montones de civilizaciones galácticas, y que no les habrá pasado desapercibido un planeta «tan atractivo» como el nuestro, concluía que deberían de haber venido a la Tierra. Sin embargo, «¿dónde están?». Se habla desde entonces de «el gran silencio» y de la «paradoja de Fermi».

La pregunta puede referirse a una visita o a un simple contacto. La visita es, por supuesto, mucho más difícil, por la dificultad de los viajes interestelares. Estos son imposibles para los humanos actuales; se estima que un viaje a un exoplaneta consumiría los recursos mundiales de muchas generaciones, además de un tiempo desorbitado. Para otras civilizaciones se ha invocado la

LAS EXPLOSIONES DE RAYOS GAMMA

El principal candidato para las extinciones de zonas galácticas extensas son los GRB o estallidos de rayos gamma, emisiones descomunales asociadas con la fusión de estrellas binarias de neutrones (GRB cortos) o con explosiones extraordinariamente energéticas (GRB largos, que son la mayoría). Los GRB cortos duran menos de dos segundos, y los largos, desde varios segundos a minutos, pero también se han dado casos en los que el estallido ha durado varias horas (ultralargos). Son los acontecimientos más energéticos del universo: un solo estallido de rayos gamma puede liberar en unos segundos más energía que el Sol durante toda su vida. Las fuentes detectadas de GRB (una por día, en promedio) están en galaxias distantes, a miles de millones de años-luz de distancia, y, aunque son muy infrecuentes, tal vez afecten al 90 % de las galaxias, sobre todo en las zonas de baja «metallicidad».

Hipernovas y magnetares

Las explosiones seguramente se corresponden con *hipernovas*, es decir, con supernovas especialmente intensas y superluminosas (SLSN), producidas por estrellas de masa gigantesca o por los llamados *magnetares* (estrellas de neutrones con un campo magnético enorme). Se cree que la frecuencia de aparición de hipernovas (tal vez en torno a una cada 1 000 Ma para la Vía Láctea) ha ido decayendo, y algunos autores piensan que solo cuando ha descendido lo suficiente ha podido desarrollarse y mantenerse la vida compleja en la Tierra. Los GRB reducirían mucho la capa de ozono, con lo que llegaría a la superficie el componente UV del Sol y de los propios GRB. El último episodio que afectó a la Tierra pudo iniciar, desde unos 6 000 años-luz, una extinción masiva hace unos 450 Ma. Pero hay que señalar que la vida suboceánica está mucho más protegida, sobre todo si hay una gruesa capa de hielo encima. Incluso una atmósfera densa puede aminorar mucho los daños.

Los interesados pueden colaborar en el estudio de los GRB (entre otras cosas) mediante GLORIA, un proyecto europeo que emplea una red de telescopios robóticos «de acceso libre» distribuidos por el mundo.



La imagen simula el efecto que un GRB tendría sobre la Tierra: una cascada de radiación pasa a través del planeta y destroza su capa de ozono, dejando la vida superficial expuesta a la radiación solar ultravioleta.

posibilidad del empleo de la ingeniería genética y de la inteligencia artificial, acaso involucrando robots autorreplicantes. No son pocos los que opinan que todo esto está muy bien... como ciencia ficción.

El mero contacto es más fácil, y por ende más extraño «el gran silencio», pero si se piensa bien, este no es tan inesperado, ya que puede explicarse por varias razones, sin necesidad de concluir (aunque hoy no podamos descartarlo) que estamos solos en el cosmos. Puede que el desarrollo de vida inteligente sea muy raro. Cuantos menos lugares con vida inteligente haya, más probable es que sean lejanos. O que, aunque sea probable la vida inteligente, y por tanto quepa esperar que haya alguna cerca, el desarrollo de tecnología avanzada sí sea infrecuente. O bien que, aunque se desarrolle tecnología, suela durar poco por la tendencia a la autodestrucción de las civilizaciones tecnológicas. O que no sea rara la destrucción natural: algunos autores argumentan que hay procesos frecuentes que conducen a extinciones en regiones considerables de las galaxias. En los dos últimos casos, como dice el astrobiólogo de la Universidad Nacional de Australia Aditya Chopra, los extraterrestres estarían callados... porque están muertos.

También es posible que los extraterrestres no quieran, por prudencia, respeto o falta de interés, explorar ni darse a conocer —aunque quizás sí «escuchen»—. Más penosa es la posibilidad de que tal vez sus señales nos estén llegando ya, pero no seamos capaces de reconocerlas.

LOS PROYECTOS SETI

El primer proyecto SETI (siglas en inglés de «búsqueda de inteligencia extraterrestre») comenzó en 1959 con un artículo en la revista *Nature* de los físicos Giuseppe Cocconi (1914-2008) y Philip Morrison (1915-2005) titulado «En busca de comunicaciones interestelares». Allí establecían la viabilidad de estas mediante ondas de radio, y destacaban las ventajas para la comunicación interestelar del empleo de una longitud de onda de 21 cm.

El astrónomo estadounidense Frank Drake (n. 1930) llevó la idea a la práctica con el proyecto Ozma en 1960 y, un año después, tras una reunión en el observatorio Green Bank, la SETI se consideró establecida como disciplina científica. En ese encuentro, Drake propuso una fórmula (hoy célebre) para estimar el número de civilizaciones capaces de establecer comunicaciones a distancia en la Vía Láctea. La ecuación es el producto de varios factores, de los que algunos son imponderables, así que, a pesar de actualizaciones recientes de la fórmula, realmente sirve de bien poco. El propio Drake confesó en una ocasión que su ecuación era simplemente una manera de «organizar nuestra ignorancia» en la búsqueda de inteligencia extraterrestre. Tiene interés histórico debido a que en su momento sirvió para alentar el encuentro interdisciplinar en torno a la SETI, pero algunos se aplicaron a darle valores arbitrarios a las incógnitas, en muchos casos para sostener pretensiones pseudocientíficas.

Desde entonces, la financiación de la SETI ha sido muy irregular; a principios de la década de 1990, la NASA patrocinó algunas búsquedas, pero dejó de hacerlo en 1993. Desde entonces, la exploración se ha mantenido solo mediante donaciones privadas, canalizadas sobre todo a través del Instituto SETI creado en 1984.

El radiotelescopio de Arecibo, situado al norte de la isla de Puerto Rico, era hasta 2016 el que contaba con la antena de mayor superficie colectora del planeta (la correspondiente a sus 305 m de diámetro), y es el que viene aportando más datos para SETI. Tantos, que se hizo imposible llevar al día su análisis con los ordenadores disponibles, y en 1999 se puso en marcha una forma de colaboración de particulares de todo el mundo, el proyecto SETI@home («SETI en casa»). Bajo el control de la Universidad de California en Berkeley, el colaborador particular instala un programita que se encarga de descargar paquetes de datos, analizarlos y enviar los resultados de vuelta a Berkeley. En esta «computación compartida» ya han participado unos nueve millones de personas.

Es el momento de comprometerse con la búsqueda de vida fuera de la Tierra.

STEPHEN HAWKING

¿Qué tipo de señales cabe esperar?

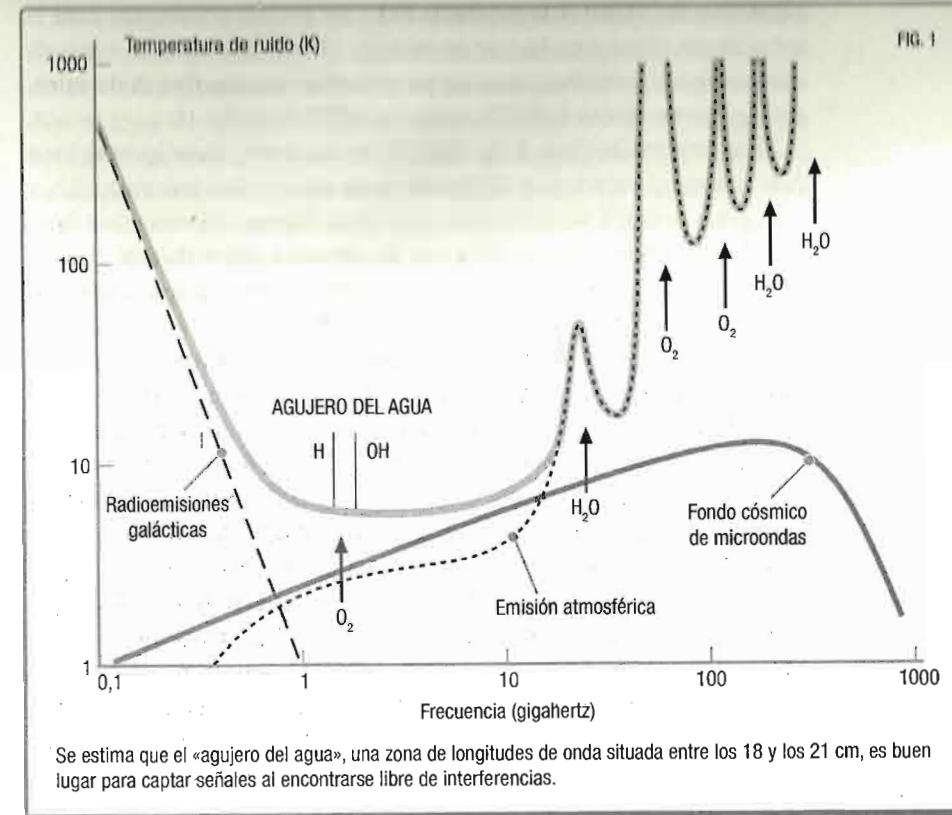
Para comunicarse hay que enviar y captar alguna forma de energía. Lo mejor a gran distancia es la radiación electromagnética. El universo es muy transparente a gran parte de ella, que nos llega desde las galaxias más remotas casi sin distorsión.

Pero aun así, el rango de posibilidades es enorme: ¿en qué frecuencia buscar? Nos ayuda a decidir el hecho de que las atmósferas más probables son muy transparentes a las ondas de radio y a la luz visible. Objetos astronómicos como las estrellas emiten con mucha potencia en el rango de luz visible, y relativamente poco en las frecuencias de radio. Así, cuando un planeta emita estas últimas frecuencias serán, en principio, más fáciles de detectar. En la banda de las ondas de radio, destaca la zona de microondas porque en ella hay menos interferencias naturales.

Y precisamente en esa zona hay una emisión singular, que «debería» llamar la atención de cualquier observador en el universo, según señalaron Cocconi y Morrison: se trata de la emisión fundamental del átomo de hidrógeno, el más abundante del universo, con una longitud de onda de 21 cm. Otra interesante es la de 18 cm, correspondiente al radical hidroxilo (OH), procedente de la rotura de la molécula de agua (H_2O), probable sustancia clave en todo tipo de vida, y por tanto de interés para cualquier inteligencia.

Por estas razones, y por estar la zona entre los 18 y los 21 cm muy libre de interferencias, se la consideró un probable «lugar de encuentro» conocido como «el agujero del agua» (figura 1). Pero, por si acaso, también se hacen búsquedas en muchas otras longitudes de onda.

A menudo se ha seguido una estrategia de búsqueda doble. Por un lado, una atención preferente sobre unos cientos de estrellas seleccionadas por su proximidad y su probabilidad de tener planetas habitables (y algunos proponen que se preste más atención al anillo del firmamento desde el que los extraterrestres podrían estudiar la Tierra por sus tránsitos ante el Sol). Por otro, un barrido más amplio y menos intenso del cielo, sobre un extenso rango de frecuencias.



Se estima que el «agujero del agua», una zona de longitudes de onda situada entre los 18 y los 21 cm, es buen lugar para captar señales al encontrarse libre de interferencias.

También hay que destacar que la sensibilidad de los sistemas de detección actuales permitiría captar desde grandes distancias señales «intencionadas», emitidas con una gran potencia, superior a la radiación «de escape» equivalente a la que sale de la Tierra (fugas) por las emisiones de radio o televisión. Además, es probable que el avance tecnológico minimice las fugas.

OSETI: el láser que busca señales de vida extraterrestre

Debido a la «rivalidad estelar», para que la radiación óptica sirva como soporte de la transmisión de señales entre civilizaciones

alejadas, debe ser intensísima. Pero se puede conseguir con la tecnología láser, con la que se generan breves pulsos de luz suficientemente potentes para ser reconocidos a grandes distancias. Así se puede hacer OSETI, es decir, SETI óptica.

Una particularidad de la OSETI es que los pulsos que se buscan son muy rápidos, y de banda más ancha que los de radio, y una gran ventaja es que para captarlos bastan telescopios ópticos de tamaño medio, al alcance de algunos aficionados.

Cómo reconocer una señal inteligente

Veamos las características que esperamos que posea una señal extraterrestre para que la consideremos artificial, es decir, producida por una inteligencia, y tal vez diseñada para ser detectada.

En principio, cualquier señal con una anchura de banda muy pequeña no se considera natural, a la frecuencia que sea. Además, cuanto menor sea el ancho de banda, menos ruido sufre la señal. Otro indicio clave para considerar una señal como inteligente es que se repita. Nadie que quiera ser detectado se conforma con un solo aviso. Se confía además en que la señal contenga algo imposible de producir por un fenómeno natural; por ejemplo, contenido matemático, como una sucesión de números primos.

Además de estas nociones básicas, hay algunas herramientas matemáticas para saber si un mensaje contiene o no información, aunque no podamos descifrarla. Una es la *ley de Zipf*, que cumplen al menos la gran mayoría de los idiomas. Esta ley empírica fue enunciada por el lingüista estadounidense George K. Zipf (1902-1950) en su libro de 1949 *El comportamiento humano y la ley del mínimo esfuerzo*. Si ordenamos las palabras de un idioma por su frecuencia de aparición, tenemos un rango. La ley de Zipf establece una relación matemática entre los rangos y las frecuencias conocida como *ley de potencias*. Se interpreta como una optimización del esfuerzo en la comunicación que cabe esperar en casi cualquier lenguaje. Resulta muy interesante que la ley de Zipf se cumple en las emisiones de sonidos de los delfines, y mejor cuanto mayor es el delfín.

Se confía en que casi cualquier lenguaje, también los extraterrestres, cumpla la ley de Zipf. Otra característica común a los diversos lenguajes es su grado de orden: no son ni muy ordenados ni muy desordenados. Al medir el orden en los mensajes de los delfines, de nuevo se cumple que se asemejan a los humanos en su posición entre el orden y el desorden.

Nuevos «óidos» para la SETI

El Instituto SETI y la Universidad de California en Berkeley están construyendo un nuevo conjunto de radiotelescopios, el ATA (de las siglas en inglés de Matriz de Telescopios Allen), que se dedicará de manera prioritaria a SETI. Ya funcionan varias decenas de las 350 antenas —de 6,1 m de diámetro cada una— que se prevé que estarán listas en 2024. Han comenzado el rastreo de señales entre 1 y 10 gigahercios (lo que incluye el agujero del agua) en las 20 000 enanas rojas más próximas, como candidatas (por su gran abundancia y extraordinaria longevidad) a albergar las civilizaciones más antiguas.

También sobresale la contribución a SETI del radiotelescopio chino individual, «de Quinientos metros y Apertura Esférica» FAST (por sus siglas en inglés), que desde septiembre de 2016 supera, con sus 500 m de diámetro, al de Arecibo como el mayor del mundo... hasta que en 2020 lo desbanque a su vez el extraordinario observatorio internacional SKA (siglas en inglés de «conjunto de un kilómetro cuadrado»), en el que colaboran un centenar de organizaciones de veinte países. SKA constará de miles de antenas, situadas en Australia y Sudáfrica, con —como indica el nombre— un millón de metros cuadrados de superficie total, unas catorce veces mayor que la de Arecibo y cinco que la de FAST. SKA detectaría el radar de un aeropuerto en un planeta situado a 50 años-luz.

En 2015, Stephen Hawking lideró, también junto con el mecenas Yuri Milner, y con Geoffrey Marcy como investigador principal, un nuevo programa, Escucha Innovadora (*Breakthrough Listen*), que durante diez años buscará señales de inteligencia

LA «FE» EN LOS OVNIS

Se habla de ovnis (acrónimo de *Objetos Voladores No Identificados*) desde 1947, y a menudo se les ha relacionado con «platillos volantes» o naves espaciales de procedencia extraterrestre. Sin embargo, es evidente que, para empezar, no todos los ovnis comparten un mismo origen.

Sin pruebas de un origen extraterrestre

En 1969, tras el análisis de más de 12 000 casos de «avistamientos», el llamado Comité Condon (un grupo de expertos dirigidos por el físico estadounidense Edward U. Condon y financiado por las Fuerzas Aéreas de Estados Unidos) emitió un informe que identificaba a los ovnis con objetos astronómicos y fenómenos atmosféricos ordinarios —aunque a veces poco frecuentes—, de modo que las observaciones y testimonios no constituyan ninguna prueba de presencias extraterrestres. El informe terminaba diciendo: «Nuestra conclusión general es que, en los últimos veintiún años, el estudio de los ovnis no ha

aportado nada al conocimiento científico. La consideración cuidadosa de la información que está a nuestra disposición nos lleva a concluir que un estudio adicional de los ovnis no puede justificarse con la expectativa de que la ciencia vaya a avanzar gracias a ello». En todo caso, podía quedar un campo de estudio para la psicología y la sociología. Desde entonces, nada sustancial ha cambiado, aquí y allá siguen surgiendo quienes creen que hay una conjura para ocultar al público la naturaleza alienígena de los ovnis, y quienes, lo crean o no, hacen de este fenómeno un negocio.

Edward Condon es conocido sobre todo por haber dirigido el comité que estudió los supuestos casos de avistamientos de ovnis de los que se tenía constancia en 1969. Pero Condon fue sobre todo un célebre físico nuclear, pionero en mecánica cuántica. Un cráter en la Luna lleva su nombre.



extraterrestre con mucha mayor capacidad que nunca antes. Esta vez, gracias a la financiación de 100 millones de dólares (cinco veces más de lo que viene gastándose en SETI), se utilizarán tres grandes radiotelescopios, que estudiarán en torno a un millón de estrellas de la Vía Láctea e incluso de un centenar de galaxias próximas, en una zona del cielo diez veces mayor que hasta ahora. Se trata de los radiotelescopios de Green Bank (Virginia Occidental), el Observatorio Parkes (Australia) y el telescopio óptico del Observatorio Lick (California). Este último se concentrará en una SETI óptica. Escucha innovadora seguirá contando con SETI@home, pues parece que podrá recoger en un solo día tantos datos como antes en un año.

La inteligencia extraterrestre no solo cabe encontrarla mediante captación de señales de radio, es posible que se pueda inferir su existencia a través del hallazgo de ciertas anomalías en el entorno de un planeta, por ejemplo indicativas de lo que el astrofísico ruso Nikolái Kardashov (n. 1932) llamó civilizaciones de tipo II (capaces de aprovechar toda la potencia disponible de su estrella). Algunos vieron esta posibilidad en las extrañas fluctuaciones de luz que en octubre de 2015 se recibieron de la estrella KIC 8462852, cuyo origen sigue siendo desconocido en 2016.

LA COMUNICACIÓN (CETI Y METI)

Según una popular creencia, la comunicación con extraterrestres (CETI) ya existe gracias a que hay alienígenas inteligentes que nos visitan. Sin embargo, la convicción carece de fundamento.

Si ya hay dudas respecto a las posibilidades de que consigamos detectar un eventual mensaje procedente del espacio, no digamos ya respecto a que logremos entenderlo. No olvidemos nuestras dificultades para descifrar ciertos textos humanos, como los jeroglíficos y los mayas; solo se consiguió gracias a la piedra Rosetta, en el primer caso, y a descendientes que aún hablaban lenguajes relacionados, en el segundo. Incluso tenemos clara evidencia de que diversas especies usan o pueden aprender a usar, en grados

Creo que la señal más segura de que hay vida inteligente ahí fuera en el universo es que ninguna ha tratado de ponerse en contacto con nosotros.

BILL WATTERSON, EN SU TIRA CÓMICA
CALVIN Y HOBBES

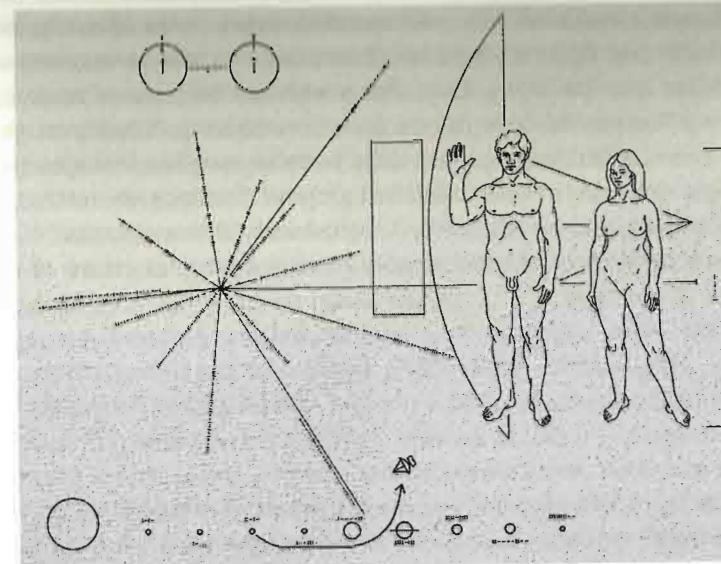
Pero también cabe tomar la iniciativa, enviar mensajes a los extraterrestres (METI). En la década de 1970, aprovechando el lanzamiento de las sondas de la NASA Pioneer 10 y 11 hacia el sistema solar exterior, se decidió incorporarles un mensaje: sobre una placa metálica de 15×23 cm (figura 2) se grabó un dibujo que representaba a una pareja humana, nuestra posición en el sistema solar y otros datos físicos.

Las Pioneer hace años que fueron rebasadas en su viaje espacial por las Voyager 1 y 2, lanzadas en 1977, pero más veloces. La Voyager 1 es hoy la nave más alejada de la Tierra. Ambas llevan un disco de oro, con datos similares a los de las Pioneer, pero además incluyen muchos sonidos e imágenes que ilustran las características de la Tierra y sobre todo de la humanidad. Entre el mensaje de las Pioneer y el de las Voyager, en 1974 se envió otro mediante ondas de radio desde el radiotelescopio de Arecibo, dirigido hacia la agrupación de estrellas M13, a donde llegará en unos 25 000 años. Más recientemente, un proyecto privado (*Lone signal*, «señal solitaria») permite el envío continuo de mensajes cortos («tufts») de particulares hacia la enana roja Gliese 526, a solo 17,6 años-luz, pero sin ningún planeta detectado. Y existe un proyecto, Un Mensaje de la Tierra, para que la nave espacial Nuevos Horizontes de la NASA, ya más allá de Plutón, emita unas cien fotografías y una hora de audio.

Estos «mensajes en una botella» más bien parecen un juego ingenuo realizado para nosotros mismos que un intento serio de comunicación. Por otro lado, respecto a los mensajes de radio, dado que existen emisiones «internas» desde 1910, su débil «escape» al espacio lleva viajando más de un siglo, por lo que ya

diferentes, comunicación simbólica o referencial, pero somos conscientes de nuestra torpeza para entenderlos, como ocurre con los delfines. Por cierto, tenemos al alcance de la mano, con tales especies, un laboratorio natural en el que investigar cuestiones relativas a otras formas de inteligencia y la comunicación con ellas.

FIG. 2



La imagen enviada en las Pioneer intentó sintetizar lo más relevante de cara a unos hipotéticos receptores extraterrestres, como la representación de una pareja humana y nuestra localización en el sistema solar.

habrá alcanzado cientos de soles. El telescopio de Arecibo podría captar nuestras emisiones de TV desde Próxima Centauri, a 4,2 años-luz. Además, los radares militares envían señales más potentes (sin ánimo METI) desde 1970.

Hacia un lenguaje cósmico

El problema para cualquier comunicación inteligente está en que los interlocutores deben utilizar un mismo código. Nos preguntamos si podríamos tener un lenguaje con el que comunicarnos con cualquier tipo de seres inteligentes fuera de la Tierra. Pero ¿qué comunicación cabe esperar si la otra especie inteligente no comparte con nosotros unos mecanismos cerebrales?, ¿y si ni

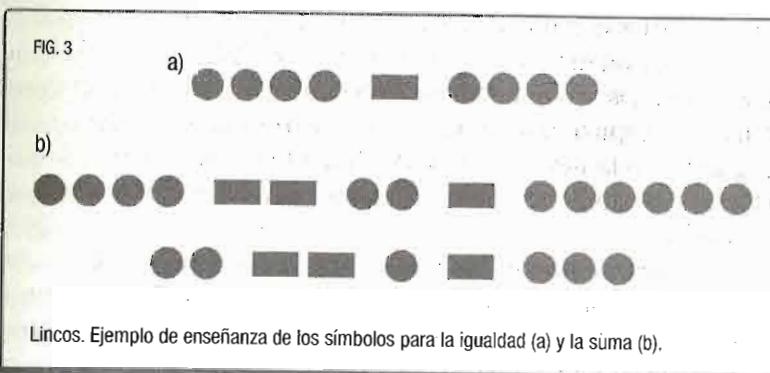
siquiera utiliza «palabras» en el intercambio de información?, ¿y si las mismas matemáticas son demasiado humanas?

Varios científicos han reflexionado sobre estas ideas, y han acabado por dejar de lado las últimas —y extremas— reservas. Asumen que las leyes naturales y algunas relaciones matemáticas y lógicas básicas deben ser universales y concluyen que, por tanto, el lenguaje común debe basarse en ellas. Por ejemplo, contar debe de ser una habilidad general (hasta la encontramos en otros animales). También debe de serlo sumar y restar. Cabe suponer, también, que cualquier inteligencia encontrará el número π , etcétera.

Con estos presupuestos, el matemático germano-holandés Hans Freudenthal (1905-1990) desarrolló en 1960 Lincos (del latín *lingua cosmica*) como posible «lenguaje de comunicación interestelar» mediante señales de radio. Se persigue que sea una lengua que se enseña a sí misma, para lo que se empieza por introducir, mediante pulsos y pausas, diversos símbolos, todo un «diccionario Lincos». En la figura 3 se muestra cómo se introducen los símbolos equivalentes a «=>» y «+».

Lincos ya fue usado en 1999 y 2003 por los astrofísicos canadienses Yvan Dutil y Stéphane Dumas para enviar mensajes científicos a estrellas cercanas. Después se han desarrollado otros lenguajes con el mismo fin, como Astraglossa y CosmicOS.

Sea de quien sea la iniciativa, con un lenguaje común podría plantearse una «charla». Entonces surgiría otra contrariedad: el



EL CONTACTO CON INTELIGENCIAS LEJANAS

tiempo necesario para el intercambio de mensajes. Si, con enorme suerte, hubiera una civilización en el cercano Wolf 1061c, un simple saludo correspondido nos llevaría 27,6 años. Con menos fortuna, pero aún mucha, nos meteríamos en siglos o milenios. ¿Y si hubiera 100 000 millones de civilizaciones en el universo observable? Parece una cifra altísima, pero corresponde a una sola civilización por galaxia (o menos), en promedio, y si la más próxima estuviera en la galaxia más cercana (Andrómeda), el saludo correspondido tardaría... 5 millones de años.

En todo caso, deberíamos plantearnos si es o no conveniente empeñarnos en mantener esa «charla».

¿Debemos comunicarnos?

Dice Stephen Hawking que otra civilización «podría tener miles de millones de años de avance respecto a nosotros», por lo que «serían muchísimo más poderosos y podrían no brindarnos más importancia de la que le damos nosotros a una bacteria». También recuerda Hawking los abundantes ejemplos de choques entre civilizaciones en la historia humana, con graves perjuicios para las menos avanzadas. Entre otras cosas, ¿soportaríamos el impacto cultural de acceder al conocimiento y los valores de una civilización (y presumiblemente una inteligencia) «superior»?

Tengamos en cuenta que es mucho más fácil detectar señales que enviarlas con potencia suficiente. Así pues, si detectamos señales, seguramente serán de civilizaciones más avanzadas. Además, tenemos cierta capacidad comunicativa interestelar desde hace un suspiro, por lo que cabe esperar que otra civilización que la tenga la lleve disfrutando desde hace mucho más tiempo (fácilmente, millones de años)... tiempo de adelanto respecto a nosotros.

Otros destacan, en cambio, lo que nos podría ayudar la comunicación con una civilización más avanzada y «benefactora». Así pues, el debate está servido. En 2015, en el desarrollo del proyecto Escucha innovadora, científicos como Geoffrey Marcy,

Seth Shostak (n. 1943) y Frank Drake discutieron sobre la conveniencia de enviar misivas al espacio, y advirtieron que «antes de enviar ningún mensaje, debe tener lugar en todo el mundo una discusión científica, política y humanitaria». Precisamente el proyecto Mensaje Innovador (*Breakthrough Message*) pretende, de entrada, alentar esa discusión y, eventualmente, concretar posibles mensajes mediante un concurso público.

Nuevos horizontes

Durante milenios hemos tenido que conformarnos con especulaciones sobre la existencia de vida e inteligencia extraterrestres. Era un terreno dominado casi en exclusiva por la filosofía, por un lado, y el esoterismo, por otro, pero las esperanzas y temores también han alimentado la creatividad de los cineastas y escritores de ciencia ficción. En el siglo xx, el estudio de las posibilidades de vida extraterrestre cayó en el descrédito o la marginalidad científica, en parte por el abuso de los pseudocientíficos. Hoy el panorama está cambiando a un ritmo vertiginoso, y empezamos a asomarnos, desde la multidisciplinariedad científica que acoge la astrobiología —es decir, desde el conocimiento objetivo—, a «nuevos horizontes» (como recoge el nombre de una misión de la NASA).

Si hay vida fuera de la Tierra, como la mayoría supone, estamos por primera vez en buenas condiciones para encontrarla gracias a los proyectos científicos de exploración más ambiciosos y potentes que hemos acometido nunca. Nos hallamos en disposición, asimismo, de hacer un esfuerzo sin precedentes para detectar inteligencias lejanas (quizá en más de un sentido), pero esto parece menos probable. Es un buen momento para recordar con admiración y simpatía a los Aristarco, Epicuro, Bruno..., mientras nos adentramos en una etapa científica apasionante que acaso también afecte profundamente a las humanidades (como la filosofía y la sociología). Para bien o para mal, puede que lo que descubramos cambie no solo la visión de nuestro estatus en el universo, sino cómo nos contemplamos a nosotros mismos.

AGUILERA, J.A., *El origen de la vida en la Tierra. El mayor reto de la biología*, Barcelona, RBA, 2016.

BALLESTEROS, F.J., *Gramáticas extraterrestres*, Valencia, Publicacions de la Universitat de València, 2008.

BRIONES, C., FERNÁNDEZ SOTO, A. Y BERMÚDEZ DE CASTRO, J.M., *Orígenes. El universo, la vida, los humanos*, Barcelona, Crítica, 2015.

DARTNELL, L., *Vida en el universo. Una introducción a la astrobiología*, Madrid, Alianza Editorial, 2013.

DAVIES, P., *Un silencio inquietante. La nueva búsqueda de inteligencia extraterrestre*, Barcelona, Crítica, 2011.

GIMÉNEZ-CAÑETE, Á., GÓMEZ-ELVIRA, J. Y MARTÍN MAYORGA, D. (coord.), *Astrobiología. Sobre el origen y evolución de la vida en el Universo*, Madrid, CSIC/Los Libros de la Catarata, 2011.

GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D., *Extraterrestres*, Madrid, CSIC/Los Libros de la Catarata, 2013.

JAKOSKY, B.M., *La búsqueda de vida en otros planetas*, Madrid, Ediciones Akal, 2003.

LUQUE, B., BALLESTEROS, F.J., MARQUEZ ET AL., *Astrobiología, un puente entre el Big Bang y la vida*, Madrid, Ediciones Akal, 2009.

QUIRANTES, A., *Los exoplanetas. Otras tierras en torno a otros soles*, Barcelona, RBA, 2016.

VÁZQUEZ, M., MARTÍN, E.L., *La búsqueda de vida extraterrestre*, Madrid, McGraw-Hill, 1999.

ÍNDICE

ácido cianhídrico (cianuro de hidrógeno, HCN) 19
sulfúrico (H_2SO_4) 51, 57, 103
ADN (ácido desoxirribonucleico) 16, 19, 20, 22-24, 27, 36, 45, 59
agua (H_2O) 16-21, 23, 25, 27, 37, 39, 47-55, 57, 65, 77, 80, 87, 90-93, 96, 100, 103-106, 108-116, 118-120, 122-127, 140, 143, 146
agujero del agua 160, 161, 163
Amanecer (Dawn), sonda 114
aminoácidos 9, 18, 19, 37, 51, 52, 54, 55, 59, 60, 62-64, 144, 149
amoniaco (NH_3) 18, 51, 52, 54, 55, 100, 116, 120, 123-125, 127
Andrómeda 72, 74, 80, 169
Arecibo, radiotelescopio de 139, 159, 163, 166, 167
ARN (ácido ribonucleico) 16, 19, 20-24, 34, 43, 57, 59
mundo del 20, 59
ATA (Matriz de Telescopios Allen) 163
ATLAST (Telescopio Espacial de Tecnología Avanzada con Abertura Larga) 150
autopoiesis 33, 35
azotosoma 55-57, 123, 124
Benner, Steven 55
Biofirmas, biomarcadores 32, 36, 37, 111, 141, 143, 144, 147
Brasier, Martin 17, 50
Breakthrough Listen véase Escucha Innovadora
Breakthrough Starshot véase disparo a las estrellas
Brownlee, Donald E. 66, 95
Calisto 102, 115, 116, 118, 125
CARMENES 132
Caessini-Huygens, misión 119-121, 124
Ceres 74, 101, 102, 114, 125, 128
CETI (Comunicación con Inteligencia Extraterrestre) 165
Chaisson, Eric 30, 31, 42
cloruro 18, 64, 121, 146
ciclo del carbono 94
clasificación espectral de las estrellas 82
código genético 23, 60, 62, 63

complejidad 33, 30, 42, 43, 66, 88, 100, 114
convergente, evolución 66, 156
Conway Morris, Simon 64-66
COROT 136

Dayal, Pratika 77, 78
dióxido de carbono (CO_2) 18, 47, 50, 80, 91-94, 103, 105-108, 110, 113, 115, 120, 123, 126, 127, 143
disolventes 19, 39, 48, 49, 51, 52, 54, 55, 57, 58, 66, 99
disparo a las estrellas 152
Drake, Frank 159, 170

E-ELT (Telescopio Europeo Extremadamente Grande) 148, 149
efecto hidrofóbico 53-55
Encélado 96, 101, 102, 120, 125, 128
enlaces de hidrógeno 52
ESA (Agencia Espacial Europea) 11, 111, 113, 116, 118, 119, 146, 148, 149
Escucha innovadora 163, 165, 169
estrellas, clasificación 82, 87
etano 48, 51, 52, 55, 115, 121-123, 125
Europa 65, 84, 94, 101, 102, 115-119, 124, 125, 128, 138
excentricidad orbital (ϵ) 90
ExoMars 111, 113
exoplanetas 10, 93, 95, 101, 131-136, 138-141, 145-150, 156

FAST (Radiotelescopio de Quinientos Metros y Apertura Esférica) 148, 149, 163
Fermi, paradoja de 156
formamida 51, 52, 57

galaxias, clasificación 76
Galileo 115, 116, 118
Ganímedes 102, 115, 116, 118, 119, 121, 125, 128
GRB (estallidos de rayos gamma) 78, 157

habitabilidad 77-81, 86, 89, 92, 96, 100, 101, 104, 114, 118, 120, 125, 131, 138, 139, 140, 141, 142, 145, 146, 149, 150, 155

Hawking, Stephen 153, 159, 160, 169
HITTE (índice de habitabilidad de planetas en tránsito) 139-142

IHP (índice de habitabilidad planetaria) 100, 101, 114, 125, 140
IST (índice de similitud con la Tierra) 101, 125, 130

James Webb, telescopio espacial 146, 147, 149, 150
JUICE (Explorador de las Lunas Heladas de Júpiter) 116, 118
Juno, sonda 115
Júpiter 66, 74, 92-96, 101, 102, 114-119, 125, 132, 136, 138
jupiteres calientes 132, 136, 138, 146

Kauffman, Stuart 30
Kepler, misión espacial 135-137, 146

Lincos 168
LUCA 15-19, 61
Luna 8, 65, 66, 86, 95, 101, 117, 119-121, 124, 164

magnetosfera 106, 107, 121, 141
Marcy, Geoffrey 83, 163, 169
Marte 8, 27, 74, 80, 86, 91, 95, 101, 102, 104-109, 111-114, 116, 125-128, 142
Maturana, Humberto 33-35
McKay, Christopher 71, 123, 126, 144
membranas 19, 20, 37, 53, 59, 61, 123
Mercurio 86, 101-103, 115, 119, 135
metabolismo 19, 22-28, 31, 34, 35, 51, 55, 109, 123
metano (CH_4) 18, 45, 46, 49, 51, 52, 54, 55, 96, 109, 111-116, 120-125, 145
METI (Mensajes a Inteligencias Extraterrestres) 165-167
microlentes gravitacionales (método) 131, 132
Miller, Stanley 9, 18, 122, 124, 125
minineptuno 90, 91, 148
monóxido de carbono (CO) 113, 120, 143

NASA 11, 27, 34, 35, 37, 57, 109, 110, 111, 114, 118, 119, 122, 123, 128, 135, 137, 139, 146, 147, 150, 152, 159, 166, 170

Neptuno 74, 91, 103, 110, 124, 125
NExTS (Nexo para la Ciencia del Sistema de Exoplanetas) 147
NGTS (Nueva Generación en el Sondeo de Tránsitos) 148
Nuevos Horizontes 114, 166, 170

Oparin, Aleksander I. 18
origen
 de la vida 18, 22, 34, 35, 50, 52, 54, 59, 66, 95
 del universo 67
OSETI (SETI Óptica) 161, 162, 165

panspermia 15, 16, 80, 124, 125, 128
paradoja de Fermi 156
Pioneer 166, 167
planetas salvajes 91, 96, 134, 147
PLATO (Tránsitos Planetarios y Oscilaciones Estelares) 148, 149
Plutón 74, 101, 102, 114, 125, 128, 166
polisilanos 46, 48, 49

quiralidad 62, 63

Sagan, Carl 27, 32, 34, 35, 70, 112, 115
Saturno 55, 74, 101, 102, 119-121, 125, 132, 136, 141
Schulze-Makuch, Dirk 65, 100, 101, 110
Seager, Sara 91, 144
SETI (Búsqueda de Inteligencia Extraterrestre) 158, 159, 163, 165
silano 45, 46, 48, 49, 124
silice 51, 52, 57
silicio 44-50, 124
siloxanos 48, 49
SKA (Conjunto de un Kilómetro Cuadrado), observatorio 148, 149, 163

Zipf, ley de 162, 163
zona habitable (ZH)
 estelar 77, 80, 81, 83, 86, 89, 93, 104, 138, 140
 galáctica 77-79

La vida no terrestre

Como dijo Arthur C. Clarke, «existen dos posibilidades: que estemos solos en el universo o que no lo estemos. Ambas son igualmente estremecedoras». Es posible que estemos acompañados incluso en el sistema solar, pues no se descarta la existencia de vida en varias lunas de Júpiter, Saturno y Neptuno, e incluso en el desolado Marte. El descubrimiento reciente de miles de exoplanetas (de los que hay billones en el universo), algunos similares al nuestro, aumenta extraordinariamente las expectativas de que encontremos no solo vida, sino algo mucho más improbable, vida inteligente, en otros lugares del cosmos. Puede que no estemos lejos de hallazgos que acaso cambien la visión de nuestro estatus en el universo.

Juan Antonio Aguilera Mochón es profesor de Bioquímica y Biología Molecular en la Universidad de Granada.